

快適なオフィスワーク支援を目指した空気渦輪の頬触覚ディスプレイによる触覚刺激の影響評価

佐藤 優花^{1,†1} 上岡 玲子^{2,a)}

受付日 2018年4月19日, 採録日 2018年11月7日

概要: 本研究では、オフィスワーク時に個人の心身状態を快適な方向へ変容させる、“アフェクティブオフィスワーク”の実現を目指したパーソナルな頬触覚ディスプレイの実現のため、頬へ空気渦輪を呈示する触覚ディスプレイを製作し、空気渦輪触覚刺激の呈示強度と発射間隔の違いによる印象評価実験を行った。結果より強度の違いにより触覚の強さと感情に対し異なる印象を持つことが明らかになった。発射間隔についても一部の感情を表す印象について影響のあることが明らかになった。さらに、製作した頬触覚ディスプレイのオフィスワーク支援に対する有効性を評価する第1歩として、ストレス状態が一定時間持続すると空気渦輪の触覚刺激が頬に呈示される実験を行い、心拍や脳波の生理反応、タスクパフォーマンスおよび主観評価の変化を調べ、空気渦輪触覚刺激の心身への影響を定量的に評価した。結果より空気渦輪触覚の呈示でストレスの軽減やタスクパフォーマンスに影響があり脳波から推定された感情値にも呈示条件により相反する変化が観察された。

キーワード: 空気渦輪頬触覚ディスプレイ, 印象評価, 生理反応, タスクパフォーマンス, アフェクティブオフィスワーク

Investigating Haptic Perception of Air Vortex Rings on a User's Cheek by Haptic Display to Support Affective Office Work

YUKA SATO^{1,†1} RYOKO UEOKA^{2,a)}

Received: April 19, 2018, Accepted: November 7, 2018

Abstract: In order to realize “affective office work”, which supports office workers to navigate a better and comfortable mental and physical condition implicitly with a haptic perception, we propose a personal haptic display presenting air vortex rings to cheek. As a first step of study, we evaluated subjective impression of different stimuli pairs of haptic perception generated by air vortex rings. The result suggest different stimuli pairs give different impression of intensities and emotion. And as a first step to evaluate the effectiveness of haptic stimuli for office work support, we conducted the experiment to evaluate the effects of different combinations of haptic stimuli on the subject's responses in terms of LF/HF changes, brainwave activities, task performance, and subjective assessment. The results suggest that haptic stimuli of air vortex rings of different conditions give different impressions and affect physiological responses and task performance.

Keywords: cheek haptic display with air vortex rings, subjective impression, physiological responses, task performance, affective office work

¹ 九州大学大学院芸術工学府
Graduate School of Design, Kyushu University, Fukuoka
815-0032, Japan

² 九州大学大学院芸術工学研究院
Faculty of Design, Kyushu University, Fukuoka 815-0032,
Japan

^{†1} 現在, セガ エンタテインメント
Presently with Sega Entertainment Co., Ltd.

^{a)} r-ueoka@design.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

現在、活動時間の大半をオフィスで過ごす人が多いが、そこで働く約8割の人がストレスを感じ、心身に不調があるという統計結果もあることから [1], 誰もが快適に過ごせるオフィス環境の実現が重要である。また、労働者の心身状態向上が生産性向上にもつながるという考え方から、

最近では従業員の健康増進や疾病予防に企業が積極的に関与する「健康経営」という考え方も浸透している [2]。そこで、筆者らはオフィスワーク支援システムとして、人の心身状態をインタラクティブに検出し、空気生成される渦輪の強さを制御しそれを触覚刺激として頬に呈示することで人の状態を無意識に快適な方向へ変容する頬触覚ディスプレイを提案する。

触覚は HCI の分野では心地良さや不快感など情動を生成し伝達する研究として Affective Haptics が注目され、異なる触覚刺激から、情動に関わる体験の印象や触覚刺激への反応時間に影響があることが報告されている [3], [4]。しかしながら、触覚刺激の情動への影響についてはいまだ不明な点も多く [5]、その関係を理解するため、情動変化を心拍数や皮膚電気反応 (GSR) などの生理指標 [3] や刺激に対する反応時間 [6] による行動変化から定量的に評価する基礎的研究が行われている段階である。こうした触覚の情動への影響が明らかになれば、その応用としてオフィスの中で個人にあわせ心身状態を整え、生産性向上に寄与するアフェクティブな触覚ディスプレイを構築することができる可能性が高い。

本研究では、オフィスワーク支援を目的とした頬触覚ディスプレイの実現のため、その第 1 歩として頬へ空気渦輪 (以下渦輪) を呈示する触覚ディスプレイの製作と渦輪触覚刺激の呈示強度の違いによる印象評価実験を行った。さらに、頬への渦輪触覚刺激の呈示のオフィスワーク支援に対する有効性を評価する第 1 段階として渦輪触覚の生理反応やタスクパフォーマンスなどへの影響を調べるため、生体反応の指標としてストレスに着目した。社会神経科学の研究では看護師が触れた患者が主観的・客観的水準でストレスが減少したり、優しい撫でにより血圧の減少や痛みの軽減が観察されるなど、触覚が人のストレスに影響を与える可能性が示唆されている [7]。そこで、製作した頬触覚ディスプレイを用い、ストレス状態が一定時間持続すると、渦輪の触覚刺激を頬に呈示する実験を行い、心拍や脳波の生理反応、タスクパフォーマンスおよび主観評価の変化を調べ、渦輪触覚刺激の影響の定量的評価を行った。

本研究で触覚刺激として用いた渦輪は、非接触で装着の手間もいらず、空気圧を変えるだけで触覚刺激の呈示強度が変えられるため、触覚ディスプレイとしての利便性が高く、本研究の実験の運用にも優れているため採用した。また、渦輪があてやすい箇所として頬を呈示位置としたのは、一般的なオフィスワークであるデスクワーク作業中に位置の変化が少なく、呈示面積もある程度確保できるため渦輪触覚刺激が呈示しやすく、ほとんどの場合肌が露出されているので性別や季節によらず一様の触覚刺激を当てることができることを考えたためである。さらに頬は、風や温冷感、柔らかさを感じる箇所として一般的に知られており、柔軟剤のテレビコマーシャルなどで頬にタオルを当てて触感を

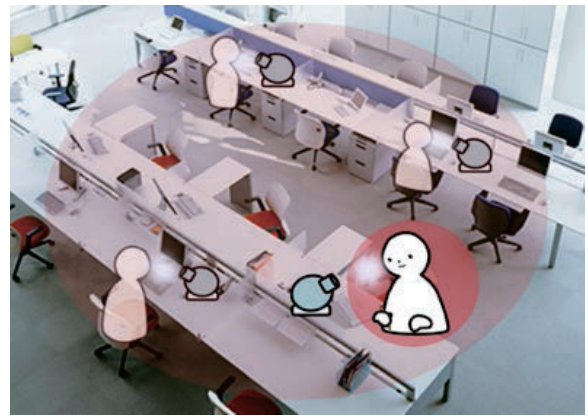


図 1 頬触覚ディスプレイの応用イメージ
Fig. 1 Application image of cheek haptic display.

感じる表現があることから頬は触覚感度が優れていると考えた。なお、本論文は [8], [9] をまとめたものである。文献 [8] で渦輪触覚刺激のストレス緩和への影響の可能性を提案し文献 [9] で定量的にその影響を評価した。本論文では具体的なアプリケーションとしてオフィスワーク支援を目的としたパーソナルな渦輪触覚ディスプレイの設計指針を確立し、将来的に図 1 に示すような頬への渦輪触覚ディスプレイにより誰もが快適に働くことができるオフィス空間の実現を目指す。

2. 関連研究

2.1 渦輪を利用した触覚ディスプレイに関する研究

空気を媒質とした触覚ディスプレイは、非接触で触覚刺激が呈示でき、制御が容易なことが特徴でこれまでも様々な触覚ディスプレイが提案されている [10], [11]。なかでも渦輪は命中率が優れており局所的な触覚刺激の呈示が可能のため、Sodhi らの Aireal [12] や Gupta らの AirWave [13] や当研究グループの先行研究である橋口らの映像コンテンツにあわせた空気砲の触覚ディスプレイ [14] など、視聴覚のコンテンツにあわせ触覚呈示をするエンタテインメントシステムが提案されている。これらは人に触覚刺激を呈示することで体験コンテンツへの没入感向上を目的としており、オフィスワーク支援を目的とし、渦輪の触覚刺激の影響をユーザの生理作用やタスクパフォーマンスから評価する本研究と目的が異なる。またこれらの先行研究では手のひらや顔面に触覚刺激を呈示しているのに対し、本研究では触覚呈示部を頬にし、空気圧の強さが異なる触覚刺激を呈示している。

2.2 触覚刺激の人への影響に関する研究

Rolls らは、fMRI を使って皮膚への触覚刺激の強弱や呈示面を変えることで皮質野に異なる反応があることを示している [15], [16]。これはサイエンスの基礎研究として重要な知見を示した研究であるが、HCI の分野で触覚と人の関

係について定量的評価をした研究事例はまだ少ない [5].

Gatti らはパソコンに表示された 3D 画像に合わせて力覚デバイスを用い触覚呈示時の生理反応を測定し、主観評価と生理反応の関係について定量化を試みたが、この実験では有意な相関はみられなかったと結論づけている。しかし、被験者の情動と生理反応とは関係する可能性があると言及している [3].

触覚刺激によるユーザの行動変容を目的とした研究として、Salminen らは被験者の指先に棒の回転により触覚刺激を呈示し、回転運動の呈示時間や連続性、回転方向を変化させ、その影響を検証している [6]. 実験結果から、ユーザは指先に呈示した触覚刺激の回転運動や方向の違いを知覚し、刺激の違いによって反応時間が異なることを明らかにしている。

こうした生理反応や行動への影響を調べた先行研究では触覚刺激の違いで人が異なる反応を示す可能性を言及しているがその機序についてはまだ明らかにされていない。機序の解明のためには様々な知見が必要とされるため、筆者らが本研究で取り組む渦輪触覚刺激の影響の定量的評価は他の研究事例もないため、機序解明のための一助となり、その知見が HCI 分野で具体的な Affective haptics のインタフェースへ応用されることも期待できる。

また、Nishimura らは、被験者の胸部に擬似的な心拍の振動触覚刺激を呈示するインタフェースを開発し、振動触覚によってユーザの心拍や印象が変化することを示している [17]. Alonso らはユーザの手に振動を与えることでストレス軽減を目的とした触覚フィードバックのプロトタイプを開発している [18]. Pels らは、食事の過剰摂取を防ぐため腹部の周りに膨張する装着型バッグのインタフェースを提案している [19]. 食事の際に腹部に触覚フィードバックを与えるベルトを装着し、被験者に 2 日間過ごしてもらった結果、食事をとると実際に自らの脂肪が増えたように感じたことと回答したことから、触覚フィードバックによってユーザの食事行動が変容する可能性を示している。

文献 [17], [18], [19] らの研究は印象や生理反応、人の行動に影響を及ぼす可能性のある触覚刺激を呈示するインタラクティブインタフェースの提案を目的とし呈示刺激は単一の刺激を用い、本研究で行っている複数の条件の刺激呈示による影響の違いなどは調べていない。

3. 頬触覚ディスプレイの製作

3.1 頬触覚ディスプレイシステム

図 2 に本研究のために製作した頬触覚ディスプレイシステム概要図を示す。勢いよく噴き出した空気は筒 (図 2 Air Cannon) の表面に沿って移動し、筒の中心部の速さと側面部の速さのずれによって空気が巻き上がり渦輪が生成される。本システムでは、筒から吹き出す空気の圧縮率を変えることで渦輪の速度を変え、頬に当たる触覚の強度を

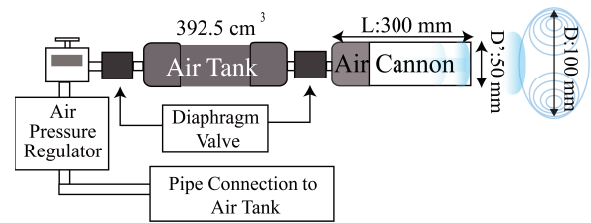


図 2 頬触覚ディスプレイシステム概要図

Fig. 2 Cheek haptic display diagram.

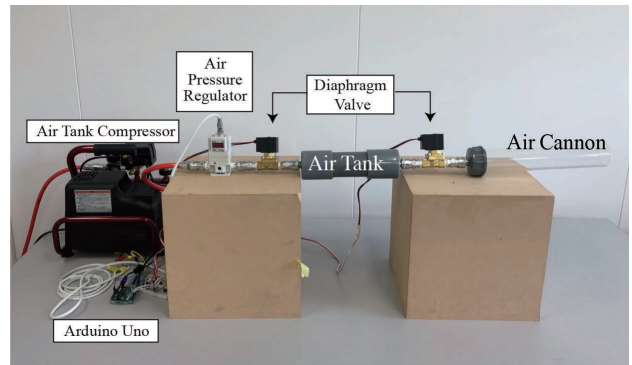


図 3 頬触覚ディスプレイ

Fig. 3 Cheek haptic display.

変える仕組みとした。圧縮空気の筒への送出入は空気操作式のダイヤフラムバルブ (SMC VXED2130-02-6G1) を用い制御した。また図 2 の孔径 D' から押し出された空気の渦輪直径 D は $D \approx 2D'$ となる [20]. 渦輪の直径は成人の頬の大きさの平均に合わせて約 100 mm に設定し [21], 渦輪直径に合わせて筒の孔径を 50 mm とした。圧縮空気が空気タンクから勢いよく押し出され長さ L の空気柱となる時、渦輪の形状にすべて丸め込むことのできる噴出量に限界があり理論上では $L/D' \approx 4$ で限界に達し、これを渦輪の最適状態と見なしている。そしてこれ以上の過度な過度は渦輪の背後に引きずられるジェットとしてとり残される [22]. 実際はシステムによって空気の速度や筒周囲の空気の流れが異なるため L/D' の最適な比率が異なるので実験をもとに調整する必要がある [12]. そこで本システムで用いる筒の孔径 D' 50 mm をもとに試行を重ねた結果、ジェットは残るものの、 L/D' の最適な比率は 6 であることが明らかになったので、 L の長さを 300 mm とし、筒の体積から、空気タンクの体積を 392.5 cm^3 になるよう設計した。製作した頬触覚ディスプレイのシステムを図 3 に示す。また、電圧レギュレータによる空気圧やダイヤフラムバルブによる開閉の制御は、Arduino Uno を介しパソコン (Mac Book Pro) から行った。

3.2 頬から筒までの距離の決定

3.2.1 実験目的と手順

頬触覚ディスプレイの筒から発射された渦輪が安定するには、ある程度の距離が必要であることがシステムから発

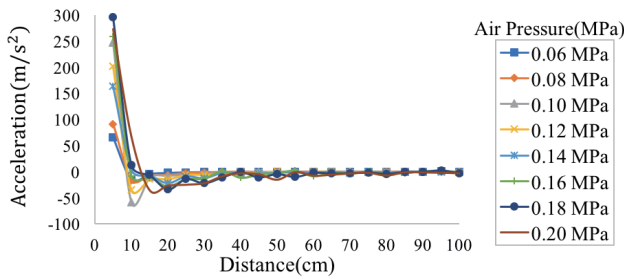


図 4 空気圧別渦輪加速度

Fig. 4 Acceleration speed of eight air pressure values.

射される渦輪の観察より明らかになった。そこで渦輪が安定し頬に一定の触覚刺激を呈示できる最適な距離を決めるための実験を行った。予備実験より渦輪生成に必要な最小空気圧が 0.06 MPa であることを明らかにし、これを最小値とした。また本システムで使用した電空レギュレータの最大出力空気圧の 0.20 MPa を最大値とした。この範囲で 0.02 MPa 間隔の 8 種の空気圧を条件とし、各空気圧の渦輪を 100 試行ずつ発射し、240 fps のハイスピードカメラ (iPad Pro) で渦輪の生成から消滅までを撮影した。実験では筒先からスモークマシンで生成したスモークを充填し渦輪を発射し、黒布の背景の前方に 100 cm の定規を設置し軌跡を可視化した。

筒から発射されたジェットを背後に引きずった渦輪がジェットから切り離され 1 つの渦輪となった位置を渦輪生成位置、渦輪が変形し崩壊した位置を渦輪崩壊位置としてその間を映像内の定規を指標に 5 cm 間隔に区切り、渦輪が各地点に到達した瞬間の動画フレーム (4.16 ms/frame) 数から渦輪到達時間を導き出し、加速度を算出した。

3.2.2 実験結果

図 4 に 8 種の空気圧の渦輪生成から崩壊までの 5 cm 間隔の平均加速度を示す。すべての条件で発射直後に渦輪は急速に加速しその後減速している。加速度 0 になる平均距離は 35 cm であった。渦輪生成位置は 15 cm から 25 cm の範囲で、渦輪崩壊位置は空気圧の違いで、40 cm から 100 cm の範囲であった。30 cm から 40 cm の範囲ではどの渦輪も生成途中でもなく崩壊もしなかった。ここから、すべての条件で加速度が 0 で渦輪が安定する最適距離は 35 cm から 40 cm であることが分かった。結果から、被験者に邪魔にならない最大の距離をとり、かつ渦輪が安定して生成される距離として、本システムでは筒から被験者の頬までの距離を 40 cm と定めた。

4. 渦輪触覚刺激の印象評価

4.1 実験目的と手順

空気圧と発射間隔の組合せによる渦輪触覚の印象を検証するため、16 条件の渦輪触覚刺激を呈示し条件により異なる印象を持つか分析した。

印象評価は 7 段階尺度の SD 法で実験を行った。評価尺

表 1 風圧触覚の強さに関する印象を表現する形容詞対 [24]

Table 1 Adjectives pairs for determining the impressions of intensity of the haptic stimuli generated by air flow [24].

	+3	0	-3
(1)	滑らかな	-	弾けるような
(2)	優しい	-	痛い
(3)	包み込むような	-	突き抜けるような
(4)	普通な	-	衝撃的な
(5)	撫でられるような	-	叩かれるような
(6)	軽い	-	重い
(7)	穏やかな	-	激しい
(8)	弱い	-	強い
(9)	柔らかい	-	かたい
(10)	ふわっとした	-	鋭い

表 2 風圧触覚の感情的な印象を表現する形容詞対 [24]

Table 2 Adjectives pairs for determining the emotional impressions of the haptic stimuli generated by air flow [24].

	+3	0	-3
(a)	気持ち良い	-	気持ち悪い
(b)	快適な	-	不快な
(c)	安心する	-	恐い
(d)	落ち着いた	-	緊張した
(e)	冷静な	-	驚く
(f)	自然な	-	人工的な

度は「非常に当てはまる (+3)」、「かなり当てはまる (+2)」、「やや当てはまる (+1)」、「どちらともいえない (0)」を含む 7 段階で、形容詞対は尺度のプラス方向にポジティブ、マイナス方向にネガティブな形容詞を当てはめた。空気圧は 0.06 MPa から 0.20 MPa の範囲を 0.02 MPa 間隔で 8 種類、発射間隔は 2 秒と 5 秒の 2 種類とし、これらの組合せによる 16 条件の渦輪触覚刺激の印象評価を行った。8 種類の空気圧は前章で示したとおり、渦輪生成のために必要な最小空気圧と電空レギュレータの最大出力空気圧で決定した。また、発射間隔については、当研究グループの先行研究から連射のタイミングが 1 秒以上必要 [14] であることと、予備実験から早い発射間隔 (2 秒もしくは 3 秒) と遅い発射間隔 (5 秒) で被験者の反応に差がある可能性が示されているため [23]、早い発射間隔として 2 秒、遅い発射間隔として 5 秒を渦輪触覚刺激の呈示条件とした。触覚刺激呈示時間は 1 条件 30 秒とし、順番効果をなくすため、呈示順は被験者ごとにランダムにした。評価項目は、当研究グループで作成した風圧触覚の印象に関する形容詞対 28 項目の中から、特に触覚の強さに関係が強いとされる形容詞対 10 項目と感情に関する形容詞対 6 項目を抽出した [24]。被験者には 1 条件ごとに評価用紙のすべての項目に回答してもらった。強さと感情に関する評価項目の形容詞対を表 1 と表 2 に示す。実験は、被験者 10 名 (男性 3 名、女性 7 名、

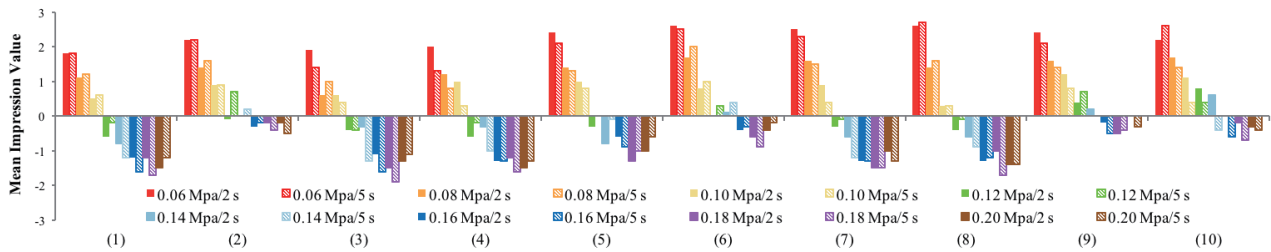


図 5 強さに関する印象評価の結果 (横軸の数字は表 1 の番号に準ずる)

Fig. 5 Impression of intensity of ten conditions (The numerical letters of x axis are equivalent to those of Table 1).

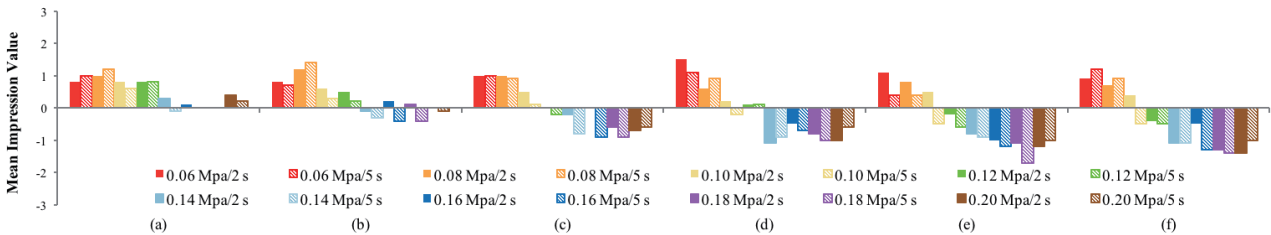


図 6 感情に関する印象評価の結果 (横軸のアルファベットは表 2 のアルファベットに準ずる)

Fig. 6 Impression of emotion of six conditions (The alphabetical letters of x axis are equivalent to those of Table 2).

平均年齢 21.3 歳) に対し行った. 被験者の頬と筒までの距離は 40 cm に統一した. 渦輪生成時の音の影響を失くすため, 被験者にはホワイトノイズを再生した密閉型のノイズキャンセリングヘッドホン (SONY : MDR-NC600D) を装着させた. また視覚情報による影響を防ぐため実験中は目を閉じてもらった.

4.2 印象評価実験の結果と考察

図 5 に触覚の強さの印象に関わる 10 項目の各形容詞対についての結果を示す. パートレット検定で等分散を検定し結果が等分散であることが仮定されたので空気圧と発射間隔の 2 要因による二元配置分散分析を各項目について行ったところすべての項目で空気圧の条件が有意であった ($p < 0.0001$, (1) $\eta^2 = 0.492$, (2) $\eta^2 = 0.454$, (3) $\eta^2 = 0.416$, (4) $\eta^2 = 0.492$, (5) $\eta^2 = 0.484$, (6) $\eta^2 = 0.493$, (7) $\eta^2 = 0.560$, (8) $\eta^2 = 0.548$, (9) $\eta^2 = 0.383$, (10) $\eta^2 = 0.386$) が, 発射間隔の条件, および空気圧と発射間隔の交互作用は有意でなかった.

ここから発射間隔によらず, 空気圧の強さにより印象が変化することが明らかになった. 次に図 6 に触覚の感情の印象に関する 6 項目の各形容詞対についての印象評価の結果を示す. パートレット検定で等分散を検定し結果が等分散であることが仮定されたので空気圧と発射間隔の 2 要因による二元配置分散分析を各項目について行ったところすべての項目で空気圧の条件が有意であった ($p < 0.0001$, (a) $\eta^2 = 0.10$, (b) $\eta^2 = 0.148$, (c) $\eta^2 = 0.304$, (d) $\eta^2 = 0.321$, (e) $\eta^2 = 0.370$, (f) $\eta^2 = 0.343$) が, 交互作用は有意でなかった. また, 6 項目中 2 項目「(c) 安心する-怖い」, 「(e)

冷静な-驚く」の形容詞対は発射間隔の条件が有意になった ((c) $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.018$, (e) $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.028$) ことから空気圧の強さに応じて異なる感情的な印象を与え, また発射間隔の違いによっても恐さや驚きなど本能的な感情表現に関わる印象が変化する可能性があることが示された. また「(a) 気持ち良い-気持ち悪い」と「(b) 快適な-不快な」の 2 項目は他の形容詞対に比べて空気圧の強度による印象評価の差が小さいことから渦輪の触覚刺激は気持ち悪い・不快などの感情的にネガティブな印象を与えにくい, 逆に考えると渦輪の触覚刺激は不快感を感じにくい刺激であり, オフィスワークを想定した長時間の利用でも不快感を与えることは少ないと考えられる.

実験の結果から印象の変化は空気圧の強さに関係することが明らかになった. そこで, 次章の実験で呈示する渦輪触覚刺激の空気圧を強さの印象が最も対照的な 2 種類を結果から選んだ. 実験対象として対照的な空気圧を 2 種類選択した理由は今回の実験が生理反応やタスクパフォーマンス, 主観評価の影響を調べる初めての実験のため, 触覚刺激を対照的な 2 種類にすることで, 渦輪触覚の呈示効果がある場合, その差が顕著に出現するような条件を設定するねらいがあった. 選択方法は, 触覚の強さの印象に関する 10 項目の形容詞対を 2 変数としピアソンの相関係数を算出し, それぞれの形容詞対が有意に正の相関があることを確認した後 ($\bar{r} = 0.8$, $p < 0.001$), 10 項目すべての印象評価の結果を加算し平均を算出した. パートレット検定で等分散を検定し結果が等分散であることが仮定されたので, 空気圧と発射間隔の 2 要因による二元配置分散分析を行った. 結果から, 空気圧の条件が有意であることを確認

し ($F(7, 8) = 129.9, p < 0.001, \eta^2 = 0.58$), 最も弱い印象の触覚刺激である 0.06 MPa と最も強い印象の 0.18 MPa を次章の実験で比較条件として用いる空気圧とした。

5. 渦輪触覚刺激の呈示による生理反応, タスクパフォーマンス, 主観評価への影響

5.1 実験目的と手順

渦輪触覚刺激を呈示することで生理反応やタスクパフォーマンス, 主観評価にどのような影響があるかを検証するため, タスク作業を行う被験者の心拍と脳波を測定し, 心拍変動からストレス状態と判定された場合に触覚刺激またはコントロール条件として音刺激を呈示した。触覚刺激は前章の実験より 2 種類の空気圧 (0.06 MPa と 0.18 MPa) とした。それを 2 種類の発射間隔 (2 秒と 5 秒) と組合せ 4 条件とした。前章の印象評価実験の結果では渦輪の強さに関する印象では発射間隔の違いによる影響は示されなかったが, 感情項目で 2 項目に発射間隔の違いで有意な影響がみられ, 前述したとおり [23] の予備実験で異なる発射間隔により反応の違いが表れる可能性があったため, 本実験でも空気圧の条件だけでなく発射間隔を組み合わせた条件で実験を行った。

また, 実験で用いた頬触覚ディスプレイでは, ソレノイドバルブの弁を開き圧縮空気を噴出するため, 発射時に大きな音が発生する。4 章の実験で被験者はホワイトノイズを流したノイズキャンセリングイヤホンを装着していたが, 渦輪生成時の音を完全に防ぐことはできなかった。そこで本実験で観察する生理反応やタスクパフォーマンスが純粋に渦輪触覚刺激の影響であることを検証するため, 渦輪生成時の発射音を事前に録音し, その音源をスピーカ (Gateway Edison 2.0) から再生し, コントロール条件とした。再生音源は 0.06 MPa/5s の渦輪の発射音に統一し, スピーカは頬触覚ディスプレイと同様に被験者の頬から 40 cm 離し設置した。実験は被験者 11 人 (男性 6 人, 女性 5 人, 平均年齢 21.8 歳) に対し, コントロール条件と 4 つの渦輪条件を各 1 日ずつ合計 5 日間行った。順序効果をなくすため, 被験者によって条件の順序はランダムにした。実験は風の影響がなく室温 25 度に保った部屋で行い, 実験中は周囲が気にならないよう被験者のスペースを黒いカーテンで仕切った。被験者の体調統制として前日の夜は十分な睡眠をとり, 実験の 1 時間前までに食事を終え空腹を感じない状態で参加するよう指示した。実験の様子を図 7 に示す。

実験では SPI 試験と TOEIC 試験に基づき作成した能力問題 30 分を 1 タスクとし, 合計 4 タスクを行った。30 分の時間制限内に問題を回答してもらうことで意図的にストレス負荷を与えた。タスク課題は条件数に合わせ 5 種類用意し実験日ごとに違う問題を回答してもらった。各問題は難易度に応じ設問ごとに異なる回答時間を設定し, 回答

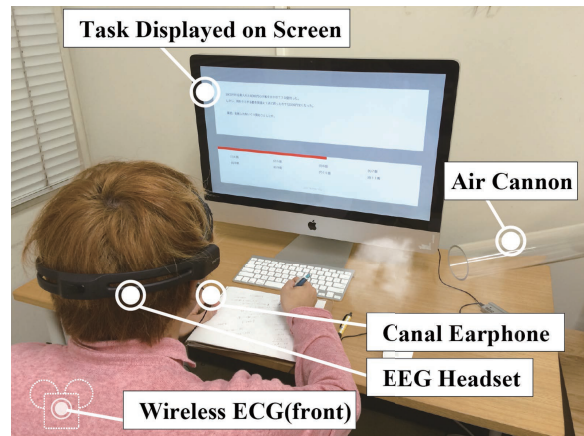


図 7 実験の様子 (スモーク充填渦輪は合成写真)

Fig. 7 Experiment setup (Air vortex ring is synthesized for the purpose of explanation).

時間	5分	30分	30分	30分	30分
内容	安静	タスク 1	タスク 2	タスク 3	タスク 4
VAS検査	○	○	○	○	○
心拍計測	[Bar]				
脳波計測	[Bar]				
渦輪発射		基準値決定	基準値を一定以上超えた場合, 60秒間渦輪発射		

図 8 実験の流れ

Fig. 8 Experiment flow.

するタスクによらず一定の難易度になるよう工夫した。各タスクの間には主観評価として, VAS (Visual Analogue Scale) 検査に基づく「疲労 (Fatigue)」「眠気 (Conscious drowsiness)」「集中力散漫 (Carelessness)」の 3 項目について回答してもらった。回答時には前の回答を見せず, 現在の状態の絶対評価とした。1 日の実験の流れを図 8 に示す。

ストレス状態の測定については, CM3 社製のワイヤレス心電計 (RF-ECG2) を用いた [25]。被験者から見て左の心臓側の胸骨角と平行に, 鎖骨中線から垂直におろした位置を中心としワイヤレス心電計をディスプレイ電極 (ブルーセンサ M-00-S) を用い貼付し, 204 Hz のサンプリングレートで心電を取得し心拍の RR 間隔からストレス値を算出した。具体的には TCP/IP 通信で受信した RR 値から高速フーリエ変換によって低周波成分 LF (0.04 Hz–0.15 Hz) と高周波成分 HF (0.15 Hz–0.5 Hz) の積分値の比率 LF/HF を算出しストレス状態を推定した。LF/HF の変動には個人差があり絶対的な基準値を設定することはできない。そのため各被験者の最初のタスク課題を基準値算出のための予備タスクとし, 刺激を呈示しない状態でタスク課題を回答してもらい, そのタスク中に計測された LF/HF の平均を各被験者の基準値とした。そのためタスク 1 の計測データは結果の分析には含めていない。タスク 2 以降の課題中, 最新の 30 サンプルを参照し, タスク 1 から算出した

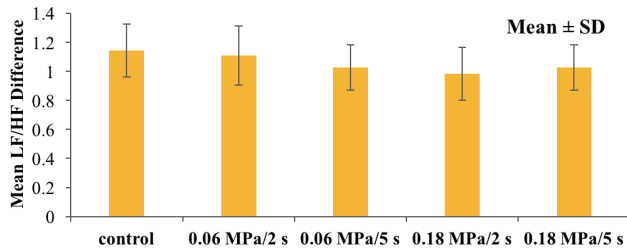


図 9 条件別 LF/HF の変化
Fig. 9 LF/HF change of each condition.

基準値よりも高い値が 30 サンプル中に 70%以上含まれた場合ストレス状態であると定義し、60 秒間継続して触覚刺激または音刺激を呈示した。その後 60 秒間は休止区間とし、触覚刺激または音刺激は呈示しなかった。

実験中の生理反応の計測はストレス状態を測定するために算出した LF/HF を記録した。また、脳波測定もあわせて行った。測定には 16 個の電極を持つワイヤレス脳波計 (EMOTIV EPOC+, EMOTIV 社) を用い [26], 測定データは、EMOTIV 社が独自のアルゴリズムで定めた 4 つの感情値 (short Excitement, Engagement, Frustration, Meditation) を各々 0–100 の範囲で数値変換する SDK を用い 256 Hz のサンプリングレートで記録した。EMOTIV を用いた HCI 研究の多くは、脳波の生データを用いた周波数解析によって感情を推定しているが [27], [28], [29], [30], 本実験では渦輪触覚刺激による脳波の変化の有無を検証する予備実験として、EMOTIV 社が提供している感情値を分析指標として用いた。

5.2 実験結果

コントロール条件を含め 30 分のタスク課題回答中に刺激呈示された回数の平均は 12 回 ($SD = 1.9$) で、実験中はすべての条件で刺激が呈示された。以下計測内容別に結果を示す。

5.2.1 LF/HF によるストレス値の変化

各被験者の安静時 5 分間の LF/HF の平均を基準値とし、タスク 2 から 4 の LF/HF の差分平均を算出した。図 9 に条件別の LF/HF の変化を示す。

結果をバートレット検定で等分散検定したところ帰無仮説が棄却されたため、クラスカル・ウォリス検定によるノンパラメトリック法の分散分析を行ったところ有意であったため ($x^2 = 82.329, df = 4, p < 0.0001$)、さらにステイル・ドゥワス法による多重比較検定を行ったところ、表 3 に示すように、0.06 MPa/2s 以外の渦輪条件 (0.06 MPa/5s: $M = 1.025, SD = 0.312$; 0.18 MPa/2s: $M = 0.984, SD = 0.364$; 0.18 MPa/5s: $M = 1.026, SD = 0.362$) は触覚刺激なしのコントロール条件 ($M = 1.144, SD = 0.362$) と比較し有意にストレス値を減少させた。0.06 MPa/2s の条件 ($M = 1.108, SD = 0.406$) はコントロール条件と比

表 3 LF/HF; 多重比較結果

Table 3 LF/HF; multiple comparison method result.

条件		有意確率	効果量
control	vs 0.06 MPa/2 s	$p = 0.053$	$r = 0.09$
	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.35$
	vs 0.18 MPa/2 s	$p < 0.01$	$r = 0.44$
	vs 0.18 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.35$
0.18 MPa/2 s	vs 0.06 MPa/2 s	$p < 0.01$	$r = 0.32$
	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.12$
	vs 0.18 MPa/5 s	$p < 0.05$	$r = 0.13$
0.06 MPa/2 s	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.05$	$r = 0.23$
	vs 0.18 MPa/2 s	$p < 0.01$	$r = 0.32$
	vs 0.18 MPa/5 s	$p < 0.05$	$r = 0.22$

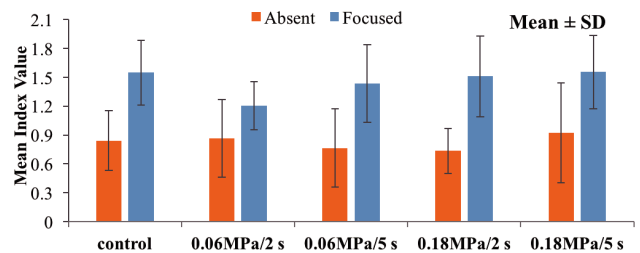


図 10 Absent と Focused の指標値
Fig. 10 Absent and focused index value.

較し有意でなかった。4 つの渦輪触覚刺激呈示条件の間で比較すると、0.18 MPa/2s 条件は他の条件より有意にストレス値を減少させた。一方、0.06 MPa/2s 条件は他の条件より有意にストレス値を増加させた。

5.2.2 脳波の変化

渦輪の触覚刺激による脳波の変化の有無を検証する予備実験として、EMOTIV 社が独自のアルゴリズムで提供している 4 つの感情指標を分析対象とし結果を分析した。散漫状態を示す指標として EMOTIV の感情値の 2 指標、Meditation/short-term Excitement の比率値を Absent と定義した。また、集中状態を示す指標として Engagement/Frustration の比率値を Focused と定義した。図 10 に各条件の Absent, Focused の結果を示す。Absent, Focused の各結果をバートレット検定で等分散検定したところ帰無仮説が棄却されたため、クラスカル・ウォリス検定によるノンパラメトリック法の分散分析を行ったところ有意であったため (Absent: $x^2 = 50.108, df = 4, p < 0.0001$, Focused: $x^2 = 110.06, df = 4, p < 0.0001$)、さらにステイル・ドゥワス法による多重比較検定を行ったところ、表 4 に示すように、Absent ではコントロール条件 ($M = 0.841, SD = 0.623$) と比較し、0.06 MPa/5s ($M = 0.765, SD = 0.819$) と 0.18 MPa/2s ($M = 0.735, SD = 0.471$) の 2 条件は有意に散漫状態を抑制している結果が示された。Focused ではコントロール条件 ($M = 1.548, SD = 0.841$) と比較し、0.06 MPa/2s ($M = 1.205, SD = 0.864$) と 0.06 MPa/5s (0.06 MPa/5s:

表 4 脳波；多重比較結果

Table 4 EEG; multiple comparison method result.

Absent			
条件		有意確率	効果量
control	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.10$
	vs 0.18 MPa/2 s	$p < 0.05$	$r = 0.19$
Focused			
条件		有意確率	効果量
control	vs 0.06 MPa/2 s	$p < 0.01$	$r = 0.57$
	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.15$
0.18 MPa/5 s	vs 0.06 MPa/5 s	$p < 0.01$	$r = 0.53$

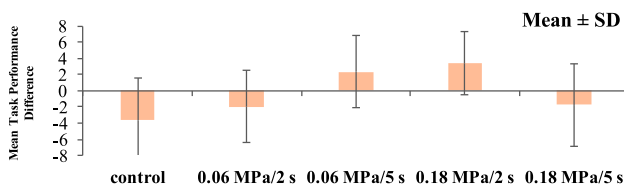


図 11 タスクパフォーマンスの平均

Fig. 11 Task performance of each condition.

M = 1.436, SD = 0.765) の条件が有意に集中状態を抑制もしくは低下させ 0.18 MPa/5 s (M = 1.554, SD = 0.923) の条件が 0.06 MPa/5 s の条件よりも有意に集中状態を上昇させる結果が示された。

5.2.3 タスクパフォーマンス

各被験者間でタスク課題の難易度による差をなくすため、問題を難易度に応じ配点し各被験者の平均値から算出した偏差値をタスクパフォーマンスの点数とした。次にタスク 1 の偏差値を基準値としタスク 2 から 4 の点数と基準値との差を比較した。図 11 に各条件のタスクパフォーマンスの結果を示す。パートレット検定で等分散検定したところ結果が等分散であることが仮定されたため、一元配置分散分析を行ったところ有意であったため ($F(4, 160) = 3.519, p < 0.01$)、ホルム法による多重比較をしたところ、0.18 MPa/2s 条件 (M = 3.389, SD = 7.671) がコントロール条件 (M = -3.6543, SD = 10.290, $p < 0.05, r = 0.78$) と 0.06 MPa/2s 条件 (M = -1.943, SD = 8.944, $p < 0.05, r = 0.64$) と比較し有意にタスクパフォーマンスの結果を向上させる条件であることが明らかになった。

また、図 12 にタスクパフォーマンスの時間推移を示す。分析の結果から統計的に有意な結果はみられなかったが、0.06 MPa の両条件とコントロール条件は後半につれてパフォーマンスが減少したのに対して、0.18 MPa の両条件は後半につれて増加傾向にあったことが観察できた。

5.2.4 主観評価

タスク課題開始前の評価値を基準値としタスク 2 から 4 の評価値と基準値の差の平均を算出した。図 13 に結果を示す。0.18 MPa/5 s 条件が眠気に関し基準値より低い値で、その他の条件はすべて基準値と比較し値が上昇したが、

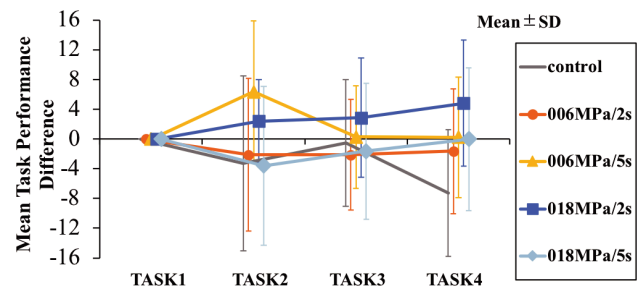


図 12 タスクパフォーマンスの推移

Fig. 12 Results of task performance over time.

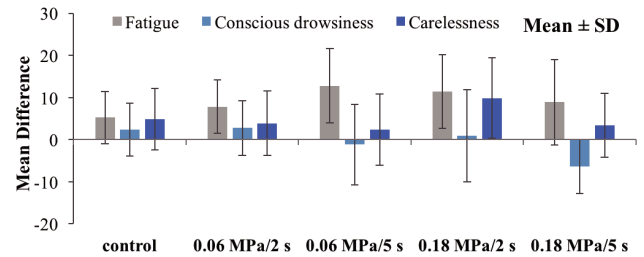


図 13 主観評価の結果

Fig. 13 Subjective assessment.

条件間に統計的に有意な違いはみられなかった。

5.3 実験の考察

実験の結果から、渦輪触覚刺激の各条件について考察する。

LF/HF の結果から、0.06 MPa/2s 条件以外の渦輪触覚は実験中のストレス上昇を抑制する効果があった。特に 0.18 MPa/2s 条件は他の条件と比較し有意にストレス値が低下したため、ストレス抑制効果が高い条件と考えられる。またこの条件は、脳波の指標である Absent の結果から、散漫状態を触覚刺激のないコントロール条件より抑制し、タスクパフォーマンス向上に効果があったことから、ストレス抑制に有効で、刺激呈示により集中力を保ちパフォーマンスを向上させる効果を持つ条件である可能性がある。一方、0.06 MPa/2s 条件は LF/HF の結果からストレス値の抑制に効果がない触覚刺激であることが示された。また、脳波の指標である Focused が低く、タスクパフォーマンスも低下していることから、ストレス値を上げ、集中を妨げ、タスクパフォーマンスの結果にも悪影響を与えた条件であったと考えられる。ここからこの条件の触覚刺激は不快感をともなう刺激だったため、生理反応やタスクパフォーマンスに悪影響があったようにも考えられるが、4 章の結果から、空気圧の低い渦輪は弱く柔かい印象で、不快な印象が低いことが示されているため、弱い触覚刺激である 0.06 MPa の触覚刺激が不快で集中力を妨げた結論づけるのは難しい。さらに発射間隔 2 秒の渦輪は 5 秒の場合と比較しリズムカルでテンポ良く感じたという被験者の意見もあったことから、0.06 MPa/2s 条件は、不快な刺激とい

うよりは、むしろリズムカルな心地良さから被験者に眠気を誘発する触覚刺激であったと考えられる。眠気を誘発したのであれば、脳波の Focused が低く、タスクパフォーマンスの結果が下がったことも結論として妥当であり、実験中にタスク課題を回答しなければならぬため、眠気をこらえ集中を保つことに注力したため、被験者のストレスが高いままであった可能性がある。

0.06 MPa/5s 条件は脳波の Absent・Focused の両指標が有意に減少、0.18 MPa/5s 条件は脳波の両指標が有意に増加した。今回用いた脳波の感情値は EMOTIV が独自に定めた指標であり、その計算アルゴリズムは公開されていない [26]。そのため、対極の Absent と Focused の両指標が同じ動向を示す意味の判断はできず、また呈示間隔 5 秒の渦輪条件はタスクパフォーマンスに対して有意な結果は得られなかったため、ストレス値を抑制する効果はあるが、その他の結果から発射間隔 5 秒の渦輪触覚刺激に関して人への影響の効果は低いと本研究では結論づけた。

主観評価では 3 項目すべてにおいて条件間に有意な違いはみられなかった。その理由として、設定した 3 項目（疲労、眠気、集中力散漫）は 120 分間の長時間のタスク課題の回答で明らかに評価が上昇する項目であり、実験時間による影響が反映された結果だと考えられる。本実験では、渦輪の触覚刺激は疲労や眠気、集中力散漫に対し被験者が意識的に感じるほどの即効性のある影響はなかったと考えられる。

実験結果から、空気圧の違いや渦輪の発射間隔によって LF/HF や脳波の生理反応、タスクパフォーマンスに異なる影響を与える可能性が明らかになった。特に本実験では 0.06 MPa/2s 条件はストレス抑制に効果がなく脳波計測から集中が抑制され、タスクパフォーマンスの結果を下げるといった眠気を誘発するような効果が示され、0.18 MPa/2s 条件ではストレス抑制効果があり、脳波計測から散漫状態を抑制し、タスクパフォーマンスの結果を向上させる覚醒を誘発するような効果が示された。

6. おわりに

本研究はオフィスワーク時に個人の心身状態を快適な方向へ変容させるアフェクティブオフィスワークを目的としたパーソナルな頬触覚ディスプレイの実現のため、その第 1 歩として、渦輪の触覚刺激を頬に呈示する頬触覚ディスプレイを製作した。次に頬触覚ディスプレイを用い 8 種類の空気圧と 2 種類の発射間隔を組み合わせた 16 条件で渦輪触覚刺激を呈示し触覚の強さ、感情に関する印象評価実験を行い、空気圧の条件により強さと感情の印象が異なることを明らかにした。発射間隔についても一部の感情を表す印象について影響のあることが明らかになった。また、人の生理反応やタスクパフォーマンス、主観評価への影響を調べるため、タスク課題回答中の被験者のストレス発生

時に渦輪の触覚刺激を頬に呈示し、ストレスの軽減やタスクパフォーマンスに影響があることを明らかにした。脳波に関しては EMOTIV 社が独自のアルゴリズムで定めた 4 つの感情値を分析指標としたので、今回の実験結果から結論を導き出すことはできないが、渦輪触覚の呈示条件で脳波から推定された感情値に対し相反する変化が一部の条件で観察された。

本研究で対照的な結果を出した 0.06 MPa/2s と 0.18 MPa/2s の条件がそれぞれ眠気と覚醒に関与する可能性があったことから、オフィスワーク中に集中が長時間続くような場合は眠気を誘発する刺激を、集中力が散漫している場合は覚醒を誘発する刺激を呈示することで自ら制御しにくい仕事上の緊張と弛緩状態の切替えが可能な渦輪触覚ディスプレイの実現が可能であることが示された。また、連続的に発射される渦輪自体がリズムを持ち、実験中のペースを維持するのに有効であったという被験者の意見もあったことから、渦輪の呈示により仕事上のペース維持にも貢献できる可能性がある。

また、オフィスワーク支援を前提にしたシステム実現のため長時間の使用を想定し、頭部位置が作業内容により変化する場合に備え、人の頬の位置を追跡し触覚を呈示する動的な呈示機構の実装が必要であるが、一方で今回の実験で 30 分ごとのタスク課題を行う場合、被験者は実験中に顔の位置の移動がなく渦輪を一定の距離から安定して呈示することができたことから、頬はオフィスワーク中の触覚呈示箇所として適していることが観察できた。

今後の課題として、今回の実験で対照的な結果を出した 0.06 MPa/2s と 0.18 MPa/2s の条件を使った長時間の効果検証実験のほか、印象評価で被験者が弁別した 8 種類の空気圧や発射間隔を呈示し、異なる反応の出現やその影響を調べることで、頬渦輪触覚刺激による個人の細かな状態にあわせたオフィスワーク支援の実現可能性を探りたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25350016、九州大学 QR プログラムわかばチャレンジの助成を受けたものです。

参考文献

- [1] (株)マクロミル：ストレスチェック義務化法案にともなう働く男女 1,000 人ストレス実態調査 (オンライン), 入手先 www.macromill.com/r_data/20141030stress/index.html (参照 2018-07-13).
- [2] 経済産業省：健康経営の推進, 入手先 http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/healthcare/kenko_keiei.html (参照 2018-07-20).
- [3] Gatti, E., Caruso, G., Bordegoni, M. and Spence, C.: Can the feel of the haptic interaction modify a user's emotional state?, *Proc. World Haptics Conference*, pp.247–252 (2013).
- [4] Salminen, K., Surakka, V., Lylykangas, J., Rantala, J., Laitinen, P. and Raisamo, R.: Evaluations of Piezo Actuated Haptic Stimulations, *Proc. Affective Computing and Intelligent Interaction*, pp.296–305 (2011).
- [5] Eid, M.A. and Osman, H.A.: Affective Haptics: Current

Research and Future Directions, *IEEE Access*, Vol.4, pp.26-40 (2016).

[6] Salminen, K., Surakka, V., Kylykangas, J., Raisamo, J., Saarinen, R., Raisamo, R., Rantala, J. and Evreinov, G.: Emotional and Behavioral Responses to Haptic Stimulation, *Proc. CHI 2008*, pp.1555-1562 (2008).

[7] Gould, D., Kelly, D., Goldstone, L. and Gammon, J.: Examining the validity of pressure ulcer risk assessment scales: developing and using illustrated patient simulations to collect the data, *Journal of Clinical Nursing*, Vol.10, No.5, pp.697-706 (2001).

[8] Ueoka, R., Yamaguchi, M. and Sato, Y.: Interactive Cheek Haptic Display with Air Vortex Rings for Stress Modification, *Ext. Abstracts CHI 2016*, pp.1766-1771 (2016).

[9] Sato, Y. and Ueoka, R.: Investigating Haptic Perception of and Physiological Responses to Air Vortex Rings on a User's Cheek, *Proc. CHI 2017*, pp.3083-3093 (2017).

[10] Suzuki, Y., Kobayashi, M. and Ishibashi, S.: Design of Force Feedback Utilizing Air Pressure toward Untethered Human Interface, *Ext. Abstracts CHI 2002*, pp.808-809 (2002).

[11] Hachisu, T. and Fukumoto, M.: VacuumTouch: Attractive Force Feedback Interface for Haptic Interactive Surface using Air Suction, *Proc. CHI 2014*, pp.411-420 (2014).

[12] Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M. and Israr, A.: AIREAL: Interactive tactile experiences in free air, *ACM Trans. Graph*, Vol.32, No.4, pp.1-10 (2013).

[13] Gupta, S., Morris, D., Patel, S. and Tan, D.: AirWave: Non-Contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings, *Proc. UbiComp*, pp.419-428 (2013).

[14] 橋口哲志, 大森奈央, 山本修平, 上岡玲子, 竹田 仰: 風圧型顔面触覚ディスプレイの3次元シアターへの応用, *日本VR学会論文誌*, Vol.17, No.4, pp.393-398 (2012).

[15] Rolls, E.T.: The affective and cognitive processing of touch, oral texture, and temperature in the brain, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol.34 (2010).

[16] Rolls, E.T., O'Doherty, J., Kringelbach, M.L., Francis, S., Bowtell, R. and McGlone, F.: Representations of Pleasant and Painful Touch in the Human Orbitofrontal and Cingulate Cortices, *Cerebral Cortex*, Vol.13, No.3, pp.308-317 (2003).

[17] Nishimura, N., Ishi, A., Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Facilitation of Affection by Tactile Feedback of False Heartbeat, *Ext. Abstracts CHI 2012*, pp.2321-2326 (2012).

[18] Alonso, M.B., Hummels, C.C.M. and Keyson, D.V.: Squeeze, rock, and roll; can tangible interaction with affective products support stress reduction?, *Proc. TEI'08*, pp.105-108 (2008).

[19] Pels, T., Goel, S. and Kao, C.: FatBelt: motivating behavior change through isomorphic feedback, *Proc. UIST'14 Adjunct*, pp.123-124 (2014).

[20] Weigand, A. and Gharib, M.: On the evolution of laminar vortex rings, *Experiments in Fluids* 22 (1997).

[21] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: AIST Japanese head size database (online), available from <https://www.dh.aist.go.jp/database/head/index.html> (accessed 2018-04-13).

[22] 福本康秀: 渦輪 (渦運動の基礎知識), *日本流体力学学会誌* ながれ, Vol.25, No.3, pp.265-280 (2006).

[23] 山口真美, 山本修平, 上岡玲子: 空気砲触覚による生理状態制御のための基礎的研究—Puff・Puff System: ユーザに寄り添う空気玉システム, *電子情報通信学会マルチメ*

ディア・仮想環境基礎研究会 (MVE) 予稿集, pp.83-88 (2013).

[24] 橋口哲志, 高森文子, 上岡玲子, 竹田 仰: 空気砲による風圧型顔面触覚ディスプレイの印象評価, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol.14, No.4, pp.73-80 (2012).

[25] CM3社: RF-ECG2 (オンライン), 入手先 (<http://gm3.jp/rf-ecg.html>) (参照 2018-04-19).

[26] EMOTIV社: Epoc+ Mobile EEG (オンライン), 入手先 (<https://www.emotiv.com/product/emotiv-epoc-14-channel-mobile-eeeg/>) (参照 2018-04-13).

[27] Andujar, M. and Gilbert, J.E.: Let's learn!: Enhancing user's engagement levels through passive brain-computer interfaces, *Ext. Abstracts CHI'13*, pp.703-708 (2013).

[28] Huang, J., Yu, Y.W.C., Liu, S., Zhao, Y., Mo, J.L.C., Shi, Y. and Zhang, L.: FOCUS: Enhancing children's engagement in reading by using contextual BCI training sessions, *Proc. CHI'14*, pp.1905-1908 (2014).

[29] Szafr, D. and Mutlu, B.: ARTFuL: Adaptive review technology for flipped learning, *Proc. CHI'13*, pp.1001-1010 (2013).

[30] Szafr, D. and Mutlu, B.: Pay attention!: Designing adaptive agents that monitor and improve user engagement, *Proc. CHI'12*, pp.11-20 (2012).



佐藤 優花

2018年3月九州大学大学院芸術工学府博士前期課程修了。同年4月株式会社セガエンタテインメントに入社。現在、同社勤務。在学中は空気渦輪触覚の研究に従事。



上岡 玲子 (正会員)

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了後、日本電信電話株式会社ヒューマンインタフェース研究所勤務。その後、米国衛星通信会社PanAm-Satにて衛星通信インフラを使ったデータ通信サービスの構築に携わり、東京大学先端科学技術研究センター協力研究員を経て、東京大学大学院工学系研究科博士課程入学し学位を取得(博士(工学))。東京大学インテリジェントモデリングラボラトリー特任助手、東京大学先端科学技術研究センター特任助教、産業技術総合研究所産総研特別研究員等を経て2012年4月より九州大学大学院芸術工学研究院准教授。