

## バーチャルリアリティ (VR) と近赤外分光法 (NIRS) による 客観的ストレス評価技術の研究開発

守 屋 正 道<sup>\*,\*\*</sup> 土 屋 航<sup>\*\*\*</sup> 不破野 有 華<sup>\*\*\*</sup>  
酒 谷 薫<sup>\*</sup>

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF OBJECTIVE STRESS ASSESSMENT TECHNOLOGY USING VIRTUAL REALITY (VR) AND NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS)

Masamichi Moriya, Wataru Tsuchiya, Yuka Fuwano, and Kaoru Sakatani

Key words: stress, oxy-hemoglobin, virtual reality.

#### 緒 言

ストレス反応は、生体ホメオスタシスを維持するうえで不可欠であるが、過剰な状態が長期化すると、身体への多様な影響を及ぼす危険性がある。近年では、厚生労働省が労働安全衛生法のなかでストレスチェックを制度化しており、「こころの健康」を保つうえでストレスを客観的に把握することの重要性が認知されつつある。そのなかでも長期的ストレスは、生活習慣病などのさまざまな疾患の発症、増悪に関与しており、ストレスは喫緊の社会的課題となっている。

しかし従来のストレス評価は、質問紙による主観的評価が一般的であり、手軽に客観的にストレスを評価する方法はいまだ確立されていない。また、効果的ストレス緩和法の開発はストレス性疾患を予防するうえで重要である。我々は脳機能計測法である近赤外分光法 (near-infrared spectroscopy; NIRS) 装置を用いて脳のストレス状態の評

価法を開発し<sup>3)</sup>、本法を用いてアロマセラピーなどによるストレス緩和効果を報告した<sup>10)</sup>。アロマセラピーの他にも、運動によるストレス緩和効果については非常に注目されており、国内外において盛んに研究が進められている。更に近年では、バーチャルリアリティ (virtual reality; VR) が生活空間に浸透されつつあり、医療の現場で目にする機会も少しずつ増加している。我々のグループは VR を用いた自律神経系のストレス反応の評価法の開発にも着手している<sup>2)</sup>。

本研究の目的は、VR のゴーグルに NIRS のプローブを一体化した NIRS-VR 一体型デバイスを開発し、VR の映像提示による脳活動を NIRS で計測することにより、ストレスおよびストレスの緩和効果を客観的に評価する方法を開発することである。まず第 1 プロジェクトとしてデバイスの開発 (作製) を進め、第 2 プロジェクトとして

\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科ユニバーサルスポーツ健康科学講座

\*\* 帝京平成大学健康医療スポーツ学部リハビリテーション学科

\*\*\* 日本大学医学部附属板橋病院リハビリテーション科

Department of Human and Engineered Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Chiba, Japan.

Department of Rehabilitation, Faculty of Health Care and Medical Sports, Teikyo Heisei University, Chiba, Japan.

Department of Rehabilitation, Nihon University Itabashi Hospital, Tokyo, Japan.

VRによるストレス緩和効果について検証した。

方 法

A. NIRS-VR デバイスの開発

我々は既にウェアラブル NIRS デバイス (NeU 社製 HOT-1000, 図 1 A) を使用し、前頭前野の活動を測定してストレスをモニタリングできるシステムを開発している<sup>6)</sup>。しかし本デバイスは総ヘモグロビン (total-Hb) の測定しかできない欠点が存在していた。一方、我々は別のポータブル NIRS デバイス (Dyna Sense 社製 pocket-NIRS, 図 1 B) によって total-Hb だけでなく、酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) を含む詳細な測定が可能なデバイスも所有しているが、こちらは小型の本体とプローブが有線での接続を必要とし臨床での応用には不向きな欠点が存在していた。

今回使用する、astem 社製 Hb 133 の NIRS (図 2) は oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb の測定が可能であり、本体が非常に小型であるため、市販の VR ゴーグル (HTC 社製 Vive Cosmos) と一体化して呼吸と脈波センサーを VR ゴーグルに取り付けて生体情報を取得可能な NIRS-VR 一体型デバイスを作製できる可能性があるため以下のとおり検証した。

1) NIRS-VR デバイスには、柔軟性のある固定

パッドを使用し、NIRS プローブは前額部の中心線に左右対称 1 個ずつ設置した。各 NIRS プローブの光源と光センサーの中間点は両側眼窩ソケットの上端の中心から 3 cm 上とした。この位置は、国際脳波 10–20 システムの位置 Fp1 (左) と Fp2 (右) に相当する。これにより左右の前頭前野における脳活動をモニタリングした。

2) VR ゴーグルの鼻部に光電容積式脈波センサーを設置して脈拍波形を取得した。同時に心電図解析装置 (closswell 社製治療名人) を装着して心電図波形も記録した。

3) 開発する NIRS-VR デバイスで取得した NIRS データと既存の手法で取得していた NIRS データと生体情報を比較して、開発した NIRS-VR 一体型デバイスの性能を検証した。また、製作した NIRS-VR 一体型デバイスを被験者に問題なく装着できるかを確認した。

B. NIRS-VR 一体型デバイスの実装可否とストレス軽減効果の検証

被験者は男性 7 名、女性 3 名の計 10 名であり、研究に同意を得られた健常成人 ( $22.7 \pm 3.0$  歳) である。本研究は帝京平成大学倫理委員会の承認を得て実施した (承認番号: 2020003・R02-025)。図 3 のとおり、①デバイス装着後安静中、② VR

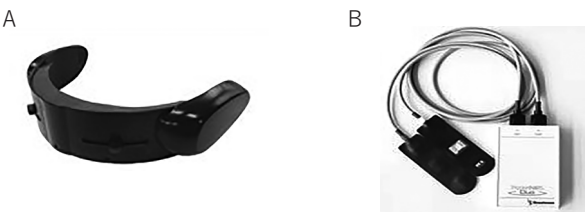


図 1. NIRS デバイス

Fig.1. NIRS device.

A: HOT-1000, B: pocket-NIRS. NIRS; near-infrared spectroscopy.

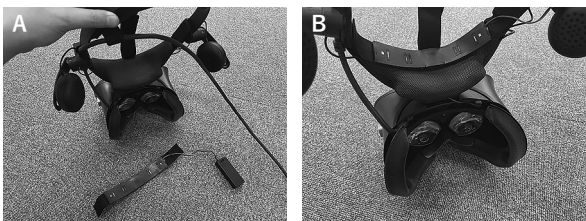


図 2. VR 一体型 NIRS (Hb 133)

Fig.2. VR Integrated NIRS (Hb 133).

A: Before wearing NIRS, B: After wearing NIRS. VR; virtual reality, NIRS; near-infrared spectroscopy.

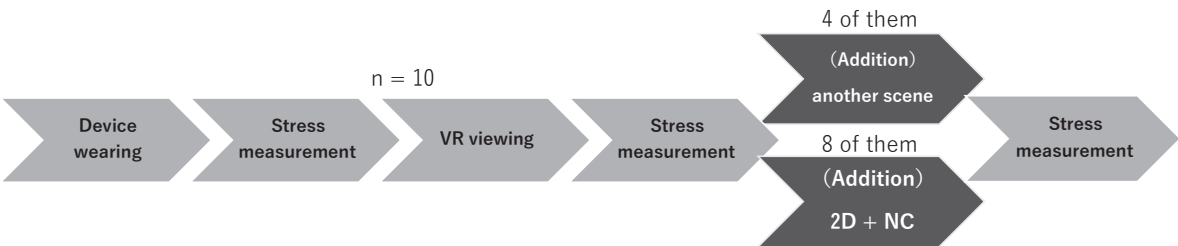


図 3. プロトコル

Fig.3. Protocol.

VR; virtual reality, NC; noise canceling.

コンテンツ視聴中、③暗算課題によりストレス計測中のデータを連続で取得した。

- 1) NIRS-VR 一体型デバイスとして装着した場合と、NIRS デバイス装着後に VR ゴーグルを装着した場合の oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb の推移を比較した。NIRS で測定可能な 3 つのヘモグロビンデータは変形 Beer-Lambert 則である、 $\Delta OD(\lambda) = \varepsilon(\text{モル吸光係数})(\lambda) \cdot \Delta c(\text{吸光物質濃度}) \cdot d(\text{光路長})$  で算出された場合に  $\text{total-Hb} = \text{oxy-Hb} + \text{deoxy-Hb}$  が成立するため、その数値を確認した。
- 2) NIRS デバイス装着後に VR ゴーグルを装着した 10 名について、VR によるストレス軽減効果を比較した。本研究では、リラクセーションコンテンツとして利用されることが多い海岸シーンの映像を使用した。その他、森林のシーン、海中のシーン、川のせせらぎシーンについても 4 名ずつ測定し追加で検証した。VR 視聴時間は 10 分とした。
- 3) NIRS デバイス装着後に VR ゴーグルを装着してストレス軽減効果を図る方法と、NIRS デバイス装着後に 2D 映像およびノイズキャンセリング (noise canceling; NC) イヤホンでリラクセーションサウンドを視聴する方法を 8 名の被験者で比較した。2D 映像はリラクセーションコンテンツとして利用されることが多い海岸のシーンを、NC イヤホン装着下で 10 分間視聴した。

### C. NIRS データ解析

デバイスの性能は oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb の推移にて比較した。oxy-Hb の左右非対称性を各被験者の安静時 LI (laterality index) から評価した。安静時の前頭前野活性の左右非対称性を解析するために、LI を以下のように計算した。

$$\Delta \text{oxy}R_{\min} = \min_{t \in \text{analysis interval}} \Delta \text{oxy}R_t$$

$$\Delta \text{oxy}L_{\min} = \min_{t \in \text{analysis interval}} \Delta \text{oxy}L_t$$

ここで、 $\Delta \text{oxy}R_t$  と  $\Delta \text{oxy}L_t$  は、休止状態の左右前頭前野の oxy-Hb 濃度変化を示す。上記式で定義された量は最小値に対する変化量であるため、常に負にならない。これに基づき LI を以下の LIR (laterality index at rest) のように定義した<sup>3)</sup>。

$$LIR =$$

$$\frac{\sum_{t \in \text{analysis interval}} ((\Delta \text{oxy}R_t - \Delta \text{oxy}R_{\min}) - (\Delta \text{oxy}L_t - \Delta \text{oxy}L_{\min}))}{\sum_{t \in \text{analysis interval}} ((\Delta \text{oxy}R_t - \Delta \text{oxy}R_{\min}) + (\Delta \text{oxy}L_t - \Delta \text{oxy}L_{\min}))}$$

分子は、解析時間にわたる合計された左右前頭前野の oxy-Hb 濃度変化の差からなる。この量は、差の代わりに、左右前頭前野の oxy-Hb 濃度変化の和で正規化する。 $\Delta \text{oxy}R_t$  と  $\Delta \text{oxy}L_t$  それ自体を最小値からの変動の代わりに使用した場合、分母は目標量が発散するところでゼロまたはほぼゼロとなり LI の定義した指数は、-1 から +1 の範囲で数値化される。正の LI は、左よりも右の前頭前野が活動的であることを示し、負の LI は、右よりも左の前頭前野が活動的であることを示す。正の LI を交感神経活動、負の LI を副交感神経活動としている。

### D. 心電図周波数解析

周波数解析には自己回帰モデルを使用し、解析の次数は 8 次か 10 次とした。自己回帰モデルの係数を求めた後、得られた R-R 間変動幅の特性関数を因数分解し、R-R 間変動幅の要素波を求めた。2 次要素波で最も周波数の低い成分の周波数は 0.1 付近となり、血压性変動といわれている周波数成分と考え、低周波数成分とした。最も周波数の高い要素波は 0.4 以上となり、通常の呼吸数では呼吸性の変動とは考えられないため、高周波数成分は最も周波数の高い要素波と低周波数成分を除外した 2 次要素波とした。副交感神経が優位にある場合に高周波成分が出現するため、高周波成分の数値を副交感神経の活性度とし、交感神経が優位でも副交感神経が優位でも低周波成分が現れるため、低周波成分と高周波成分の比である低周波成分/高周波成分 (low frequency; LF/high frequency; HF) を交感神経の活性度とした。

### E. 統計処理

測定値はすべて、平均値 ± 標準偏差で示した。統計解析には、統計ソフトウェア Graphpad Prism version8 (Graphpad Software Inc. 製) を使用した。デバイス装着後にストレステストの標準である暗算課題 (4 桁の数字から 2 桁の数字の減算を連続して行う) を被験者に 30 秒間課し、暗算課題前 (60

秒間)・暗算課題中(30秒間)・暗算課題終了後(30秒間)の oxy-Hb から LI を算出した。VR 前後の LI を二元配置分散分析を行い、各因子に有意な効果が認められた場合は、事後検定として Bonferroni の多重比較を行った。暗算課題中の心拍数と LF/HF は対応のある t 検定で比較した。また、海岸シーンの映像以外にも 3 つのシーンを使用した VR 後の暗算課題中(30秒間)および暗算課題終了後(30秒間)の計 60 秒間の LI を一元配置分散分析で比較した。更に、VR による 3D と 2D 映像に NC イヤホンによるストレス軽減効果についても二元配置分散分析を行い、各因子に有意な効果が認められた場合は、事後検定として Bonferroni の多重比較を行った。有意水準は 5 % とした。

## 結 果

### A. NIRS-VR デバイスの開発

本研究で作製を試みた VR ゴーグルに Hb 133 薄型 NIRS を一体型として装着すると NIRS の厚み分傾斜し画面がぼやける事象が発生したため、NIRS 装着後に VR ゴーグルを装着することで実験を進めることとした。2 段階での装着であれば VR 映像のぼやけは生じず、NIRS 測定においても、我々が以前から使用している NIRS デバイス(図 1 B)と同様に、total-Hb = oxy-Hb + deoxy-Hb が成立しており問題なく測定可能であった(図 4)。安静時の NIRS 波形は大きな揺らぎと小さな揺らぎが存在しており、大きな揺らぎは前述した計算

式が一致し、小さな揺らぎはほぼ一定間隔で生じていることから我々が計測してきたデバイスと同等の結果を得られていたことを確認した。

### B. VR によるストレス軽減効果

ストレスの指標としている LI は、VR 前後で有意差を認めなかった ( $F(6, 54) = 0.226, P = 0.967$ ) (図 5 A)。安静時は VR 前で  $0.13 \pm 0.5$ 、VR 後で  $-0.03 \pm 0.4$  であった。暗算開始中は VR 前で  $0.13 \pm 0.2$ 、VR 後で  $0.01 \pm 0.1$  であった。暗算課題終了後は VR 前で  $0.06 \pm 0.2$ 、VR 後で  $0.01 \pm 0.2$  であった。

一方、心拍数では有意差を認めたが ( $P = 0.021$ )、交感神経の指標としている LF/HF では有意差を認めなかった ( $P = 0.654$ ) (図 5 B)。暗算課題中 30 秒間の心拍数は VR 前で  $87.3 \pm 5.6$  bpm、VR 後で  $79.6 \pm 8.9$  bpm であった。LF/HF は VR 前で  $1.8 \pm 1.4$ 、VR 後で  $1.5 \pm 1.5$  であった。

VR の種類によってストレス反応が異なるのか海岸シーン以外にも試みたが、A (森林のシーン)、B (海中のシーン)、C (川のせせらぎシーン) のすべてのシーンにおいて有意なストレス軽減効果は認めなかった ( $P = 0.730$ )。しかし、図 3 で示した海岸シーン (normal; NL) を含め、全 4 シーンにおいて VR 後の暗算課題中(30秒間)および暗算課題終了後(30秒間)の計 60 秒間の LI は負の値であることが多く見受けられた(図 6)。

### C. 3D 映像と 2D 映像の比較

我々は VR (3D) による映像提示ではなく、2D 映像によるストレス軽減効果を追加で実施し

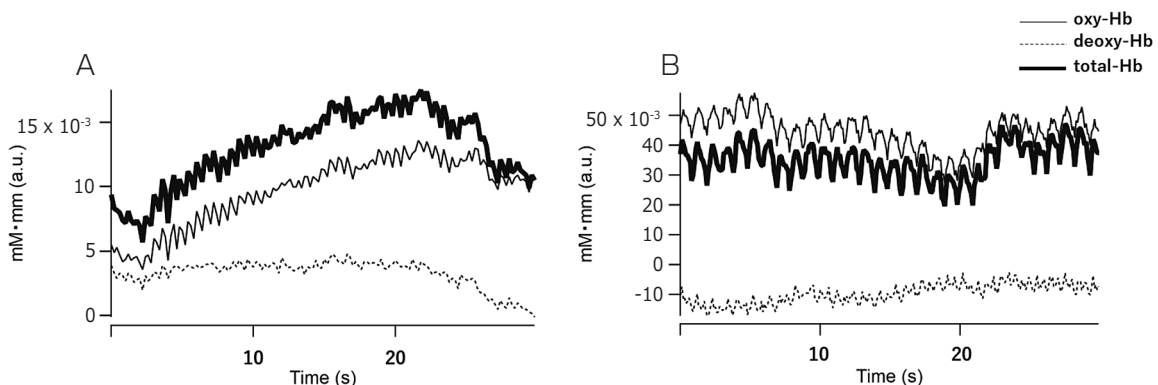


図 4. NIRS で測定した安静時 NIRS データ

Fig.4. An example of resting data measured with NIRS.

A: Hb 133 (astem), B: pocket-NIRS (Dyna Sense).

NIRS; near-infrared spectroscopy.

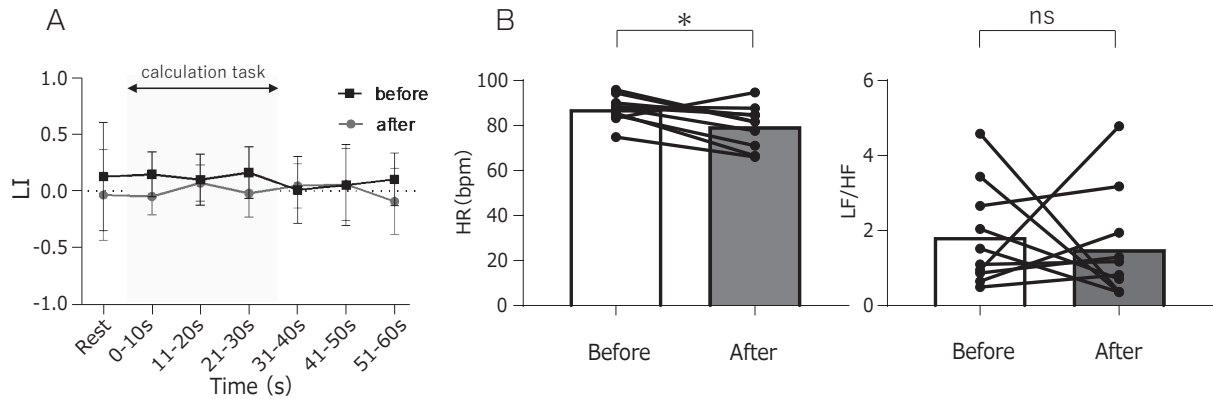


図5. A: LIの推移、B: HRとLF/HFの前後比較

Fig.5. A: Transition of LI, B: Comparison of HR and LF/HF by VR.

LI; laterality index, HR; heart rate, LF/HF; low frequency/high frequency, VR; virtual reality.

\* $P < 0.05$ .

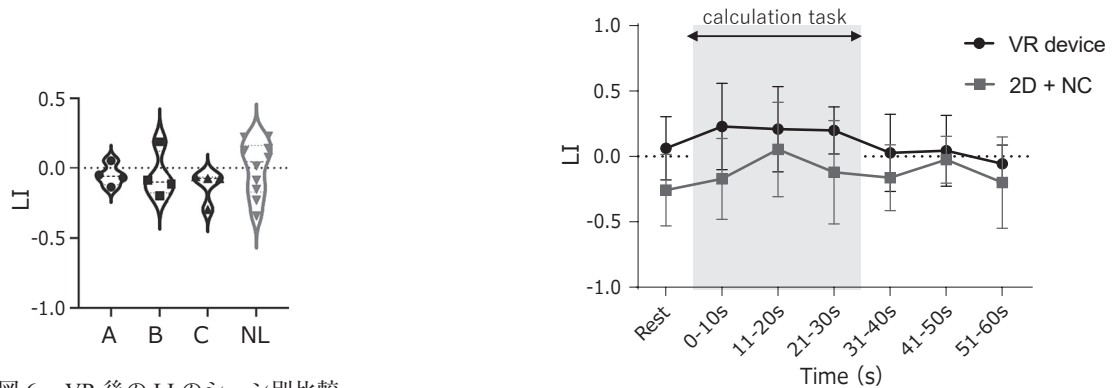


図6. VR後のLIのシーン別比較

Fig.6. Comparison of LI after VR by scene.

A: Forest, B: In the sea, C: River, NL: Beach.

LI; laterality index, VR; virtual reality.

た。二元配置分散分析で主効果のみ有意であり ( $F(6, 42) = 2.583, P = 0.032$ )、地点全体のLIはVRデバイス条件に比して2D映像およびNCイヤホンを装着した条件で低かった (図7)。更に安静時はVRデバイス条件で  $0.06 \pm 0.2$ 、2D映像およびNCイヤホン条件で  $-0.26 \pm 0.3$ であった。暗算開始中はVRデバイス条件で  $0.21 \pm 0.2$ 、2D映像およびNCイヤホン条件で  $-0.08 \pm 0.3$ であった。暗算課題終了後はVRデバイス条件で  $0.01 \pm 0.2$ 、2D映像およびNCイヤホン条件で  $-0.13 \pm 0.2$ であった。

## 考 察

本研究ではVR前後の生体情報をリアルタイムに取得可能な一体型デバイス作製を試みたが、別々に装着しても問題なくデータを取得可能であった。薄型のNIRSをVRゴーグルに取り付け

ることを考えていたが、ごくわずかな薄さでもVRゴーグル装着に支障となることが確認された。しかし、LIをはじめとするNIRSデータをリアルタイムで取得可能なデバイスを開発することは、ストレス軽減効果だけでなく、VR満足度やVR酔いの評価にも展開できる可能性があるため引き続き検討を重ねていきたい。今回は健常成人を対象に、VRによるストレス軽減効果を検証した。VR後に心拍数の有意な減少を認めたが、ストレス指標として算出したLIおよび交感神経の指標として算出したLF/HFにおいては有意な効果を認めない結果となった。不安障害関連疾患<sup>7)</sup>や精神疾患領域<sup>8)</sup>においてはVR治療の可能性が報告されており、また高ストレスの対象者においてはSTAI (State-Trait Anxiety Inventory) やLF/HFをVRによって有意に軽減する効果が報告されている<sup>5)</sup>。今回対象とした健常成人においては背景因

子として普段のストレスレベルが低く効果反応を得られにくかった可能性がある。

一方、最近では健常成人の急性ストレス軽減効果についても検討されている。Kampa らは瞑想やマインドフルネスなど他のリラクセーション方法よりも VR の効果が高いと報告している<sup>4)</sup>。そのなかでは“没入感”についても触れており、没入できる対象者であれば効果は得られやすいと考えられる。図 6 で示したとおり VR シーンが異なったとしてもストレス軽減の傾向は確認されたが有意な効果は得られなかった。その 1 つの原因として、慣れていないデバイスの装着に対する抵抗感や VR ゴグル装着による閉塞感があったのかもしれないと考えた。

そこで本研究では追加で若年の健常成人が頻用している NC イヤホンに 2D 映像を視聴させた効果を検証した。興味深いことにストレス負荷をかけている暗算課題中はもちろん、安静時から LI が低値を示していた。10 分間の自然環境のビデオ映像によって心拍数の減少を誘発した報告があるが<sup>1)</sup>、我々のデータも先行研究を肯定する結果となった。高齢者に VR を行った研究で精神・認知にネガティブな結果が報告されているが<sup>9)</sup>、高齢者にとって不慣れなデバイスを装着することに違和感があった可能性が考えられる。VR (3D) という不慣れなデバイスを装着すること自体にストレスを生じる可能性と同時に、日頃から使用しているデバイス (2D および NC イヤホン) を用いることはストレス軽減においては有効な手段である可能性が示唆された。今回は閉所恐怖症の有無や没入感の度合い、VR 経験有無などの質問紙調査は実施していないが今後調査していく予定である。

近年では VR コンテンツはもちろん、VR デバイスの進歩が目覚ましい。同時に、2D や NC イヤホンの進化も勢いを増している。今後、各個人で最良のストレス軽減可能なデバイスが何かを短時間で評価できるツールについて検討したい。

## 総 括

健常成人に対する VR によるストレス軽減効果

は限定的であり、日常生活での汎化性の高いデバイスを使用したほうが効果を得られる可能性が示唆された。

## 謝 辞

本研究の実施に対して助成を賜りました公益財団法人明治安田厚生事業団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり東京大学大学院の酒谷薫先生、日本大学医学部附属板橋病院の土屋航先生、不破野有華先生から多大なご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Benz ABE, et al. (2022): Nature-based relaxation videos and their effect on heart rate variability. *Front Psychol*, **13**, 866682.
- 2) 稲澤将太ら (2019): VR 体験中の人の覚醒度推定のための生体情報計測 Head Mounted Display の開発. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **24**(4), 377-388.
- 3) Ishikawa W, et al. (2014): Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: a near-infrared spectroscopy study. *J Biomed Opt*, **19**(2), 027005.
- 4) Kampa M, et al. (2022): Facilitating relaxation and stress reduction in healthy participants through a virtual reality intervention: study protocol for a non-inferiority randomized controlled trial. *Trials*, **23**(1), 380.
- 5) Kim H, et al. (2021): Effect of virtual reality on stress reduction and change of physiological parameters including heart rate variability in people with high stress: an open randomized crossover trial. *Front Psychiatry*, **12**, 614539.
- 6) Moriya M, et al. (2022): Effect of exercise therapy on stress response evaluated by IoMT monitoring system. *Adv Exp Med Biol*, **1395**, 205-209.
- 7) Oing T, et al. (2018): Implementations of virtual reality for anxiety-related disorders: systematic review. *JMIR Serious Games*, **6**(4), e10965.
- 8) Park MJ, et al. (2019): A literature overview of virtual reality (VR) in treatment of psychiatric disorders: recent advances and limitations. *Front Psychiatry*, **10**, 505.
- 9) Saredakis D, et al. (2021): The effect of reminiscence therapy using virtual reality on apathy in residential aged care: multisite nonrandomized controlled trial. *J Med Internet Res*, **23**(9), e29210.
- 10) Tanida M, et al. (2016): Effects of fragrance administration on stress-induced prefrontal cortex activity and sebum secretion in the facial skin. *Neurosci Lett*, **432**(2), 157-161.