

**仮想現実サイクリング運動時の競争他者が心血管応答
および運動パフォーマンスに及ぼす影響
～自律神経生理尺度を活用したメンタルバイオマーカーの開発**

順天堂大学大学院 山 中 航
(共同研究者) 同 香 月 翔 太
同 河 村 剛 光
同 和 氣 秀 文

**The Effects of Competitors on the Cardiovascular Response and
Performance during Virtual Reality Cycling Exercise – the Development of a
Mental Biomarker Utilizing Physiological Parameters**

by

Ko Yamanaka, Shouta Katsuki
Yoshimitsu Kohmura, Hidefumi Waki
*Graduate School of Health and Sports Science,
Juntendo University*

ABSTRACT

In sports, dealing with the pressure of competition determines winning or losing. Interacting with others while competing affects one's athletic performance, but the associated physiological mechanisms are unclear. This study included 14 healthy adult male participants. We developed a competition that included interacting with other competitors and was simulated using virtual reality (VR). The pedal speed, cardiovascular responses (blood pressure and heart rate), and respiratory responses were recorded during cycling exercise tasks at a constant speed (60 rpm). We observed a significant decrease in cadence (non-competitive = 59.0 ± 4.2 rpm versus

competitive = 56.5 ± 6.0 rpm, $p = 0.0067$) and significant increase in heart rates (non-competitive = 82.5 ± 9.0 bpm versus competitive = 84.1 ± 9.9 bpm, $p = 0.04$) during the competitive condition (passing/being passed by a competitor) compared to the non-competitive condition (cycling exercise with no competitors). Participants were classified into two groups: those whose cadence was relatively decreased in competitive conditions (performance-decreased group) and those whose cadence was not (performance-maintained group). Intriguingly, the cross-correlation coefficient between interacting with others and the respiratory variability was significantly higher in the performance-maintained group ($r = 0.44 \pm 0.12$, $p = 0.01$) that sustained cadence during the competitive condition compared to the performance-decreased group ($r = 0.36 \pm 0.03$). These results suggest that exercise performance is affected by competitors but regulating respiratory movements may prevent the performance decline.

キーワード

バーチャルリアリティ, 競争他者, ペダル回転数, 呼吸, 相互相関解析

Keyword

virtual reality, competitor, cadence, respiration, cross correlation

要 旨

スポーツ競技は他者と競い合うプレッシャーの中で勝ち負けや優劣が決まる。競技中における他者とのインタラクションは自己の運動パフォーマンスに影響を及ぼすが、その生理学的メカニズムの詳細は明らかでない。本研究は14名の成人男性を対象に、仮想現実 (VR) 技術を用いて他者との競争場面を作成し、一定速度でサイクリング運動を行う課題時のペダル回転数、心血管応答 (血圧、心拍数) および呼吸応答を記録した。単独で走行する非競争条件と比較して、競争条件 (競争他者を抜く/抜かれる) においてペダル回転数の有意な低下、心拍数の有意な上昇を観察した。興味深いことに、競争条件時にペダル回転数を維持できたパフォーマンス維持群において、他者とのインタラクションと呼吸変動の間に有意な相互相

関が観察された。これらの結果は、運動パフォーマンスは他者の影響を受けるが、呼吸運動を調節することによってそのパフォーマンス低下を防止する可能性を示唆する。

緒 言

スポーツ競技の多くは他者とパフォーマンスを競い、勝ち負けや優劣を決める。サッカーやバレーボールといったオープンスキルが求められる競技はもとより、陸上競技のような主としてクローズドスキルが求められる競技であっても、異なるレーンを走るライバルの存在や競争相手との相対的比較によって情動が変化し、自律神経応答変化を介して、自己の運動パフォーマンスに影響を及ぼす可能性が考えられる。例えば、マラソン競技などで他者を追い抜くことによるモチベーションの向上、逆に疲労困憊時に他者に追い抜かれたと

きに急激なパフォーマンス低下（いわゆる「心が折れた」状態になる）が生じ得ることは想像に難くない。しかしながら、実際のスポーツ競技中では完全に同一の競技場面というのは起こり得ず、運動中の条件を統制して再現性高く測定することは困難である。したがって、このような「競争中の他者との優劣」がパフォーマンスに及ぼす影響について調べることは容易ではない。そのため、先行研究として、試合直前・直後の選手へのアンケート調査などの心理的尺度を用いた情動評価や心拍数などの自律神経尺度¹⁾、あるいは卓上で実施する競争課題²⁾やロールプレイを用いたゲームなどの競争課題³⁾を用いた研究は報告されているが、スポーツ競技場面における「運動実施中」において他者が自己の生理応答や運動パフォーマンスに与える影響について、その詳細な生理学的メカニズムは不明な点が多い。

本研究では、仮想現実 (Virtual Reality; VR) 技術を用いることで上記の問題について解決を試み、競争他者によって誘発される情動変化が自己の生理応答および運動パフォーマンスに影響を及ぼすという仮説の検証を目的とする。我々は同様の実験環境を用いて、サイクリング運動時の競争中の他者とのインタラクションがもたらす心血管応答について報告してきた⁴⁾が、非競争場面から競争場面に文脈が変わったときにパフォーマンス

および生理応答尺度がどのように変化するかは明らかでない。さらに、競争他者によってパフォーマンスに影響を受ける競技者とそうでない競技者の違いは何なのか、について生理学的な観点から新たな知見を提供する。将来的に、競争他者によって誘発される自律神経性応答をはじめとした生理学的応答尺度をメンタルコンディショニングのバイオマーカーとして活用することで新しいメンタルトレーニングの開発につなげることを目指す。

1. 研究方法

1. 1 実験参加者

本研究には健康な男性14名（年齢：26.2 ± 5.7歳）が参加した。実験に先立って、実験参加者には実験内容、方法および安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。実験は順天堂大学スポーツ健康科学部研究倫理委員会（順ス倫第31-27号）の承認を得た上で実施した。

1. 2 仮想現実におけるサイクリング競争課題

直線コースをサイクリング運動するVR=空間をゲームエンジンUnity (Ver. 2018.4.15f1, Unity Technologies) を用いて作成した (図1A)。実験参加者はヘッドマウントディスプレイ (HTC Vive, HTC Corporation) を装着し、競争他者 (Cyclist Animations HD, Unity Asset Store) を抜く、また



図1 (A)VR映像と(B)実験プロトコル

は競争他者に抜かれる状況を模したVR空間内で、「サイクリング運動を一定速度 (60 rpm) で行う」よう教示された。サイクリング運動はVRと連動したバイクコントローラー (VirZoom) を用いて行われた。競争条件に先立って、「非競争条件」として、競争他者を配置せず単独でサイクリング運動 (60 rpm) を行うベースラインブロックを実施した。その後、「競争条件」として、競争他者を抜く「Win」ブロック、競争他者に抜かれる「Lose」ブロックを交互に配置し、各ブロック (3~5分) として、交互に合計4ブロック実施した。競争条件における順序効果を考慮して、Winブロックから始めるか、それともLoseブロックから始めるかは実験参加者ごとに疑似ランダムとした (図1B)。

1.3 データ集録:パフォーマンス (ペダル運動) および血圧・心電図・呼吸運動の測定

VRサイクリング運動中のペダル回転数を赤外線センサーと接続したマイクロコンピュータ (Arduino) を用いて測定した。競争条件における他者の接近は、競争他者に割り当てられたキャラクターに音を付加して実験参加者に伝わるようにした (真横の接近で最大音となりその前後で音は減弱する)。血圧は非観血式連続血圧計 (CNAP500, CNSystems) を用いて連続的に測定した。心電図電極ブルーセンサー (SP-00-S, メッツ) を胸部に貼付し、心電図データから心拍数を計算した。呼吸運動は上腹部に取り付けた圧トランスデューサーで胸腹部の容積変化に伴う圧変動を測定した。得られたアナログ信号は生体信号増幅器 (MLV-2301, 日本光電) を介して増幅し、A/D変換器 (PowerLab PL-3508, ADInstruments) を介して汎用コンピュータに取り込みの後、データ解析ソフトウェア (LabChart, ADInstruments; MATLAB, MathWorks) を用いてデータ集録および解析を行った。

1.4 データ解析

非競争条件および競争条件 (Win, Loseブロック) 間での運動パフォーマンス (ペダル回転数)、血圧、心拍数、および呼吸データの比較解析を行った。Win/Loseブロックは「競争条件」として統合してデータ解析を行った。ペダル回転数、呼吸率、血圧および心拍数について、ノンパラメトリック検定 (Wilcoxon 符号順位検定) を用いて、競争条件と非競争条件の2群間の差の検定を行った。

運動パフォーマンス (ペダル回転数) が大きく変動した実験参加者と比較的ペダル回転数を維持できた実験参加者を、それぞれ「パフォーマンス低下群 (n=7)」と「パフォーマンス維持群 (n=7)」に分類した。胸腹部に取り付けた呼吸センサーから得られた呼吸曲線から1分間の呼吸数 (呼吸率) を計算した。また呼吸率の増減の方向に関わらず、呼吸運動の変動を定量化するため、以下の式を用いて呼吸変動と定義した。

呼吸変動

= |競争条件における呼吸率

- 非競争条件における呼吸率の平均値|

競争条件におけるパフォーマンスの変化と生理学的指標との相関を調べるため、競争課題中の他者との接近度 (X, 他者の自転車走行音) と上記の呼吸変動 (Y) について、1秒毎のデータとして移動平均処理を行った後、相互相関 (C_{XY}) を以下の式を用いて計算した (MATLAB "xcorr" 関数)。

$$C_{XY}(\tau) = \sum_{t=1}^T X(t)Y(t+\tau)$$

X (t) は時刻 t における他者とのインタラクションのタイミング、Y (t) :時刻 t における呼吸運動、 τ は X と Y の間の時間差 (time-lag) を示す。得られた2変数 (他者とのインタラクションおよび呼吸変動) の相互相関係数について、競争条件での運動パフォーマンス維持群および低下群の間について、ノンパラメトリック検定 (Wilcoxon 順

位和検定)を用いて差の検定を行った。

2. 研究結果

2. 1 競争条件・非競争条件における運動パフォーマンスの比較

最初に競争条件において、非競争条件と比較して実験参加者の運動パフォーマンス(ペダル回転数)がどのように変化するか調べた。その結果、ペダル回転数の中央値±標準偏差が、非競争条件では 59.0 ± 4.2 rpm, 競争条件では 56.5 ± 6.0 rpm (Winブロック: 56.3 ± 6.2 rpm, Loseブロック: 56.7 ± 5.9 rpm)であった。非競争条件では教示した60 rpmに近い値でサイクリング運動ができていたが、競争条件(Win/Loseブロック)ではペダル回転数が有意に減少した(図2A; $p = 0.0067$, Wilcoxon符号順位検定)。

このようなパフォーマンス(ペダル回転数)の減少が競争条件に入ってからどのようなタイミングで生じたかを調べるために、競争条件における最初の1~5試行の他者とのインタラクション[抜く(Winブロック), または抜かれる(Loseブロック)]時点前後10秒間のペダル回転数を図2Bにプロットした(実験参加者14名のグループデータ)。その結果、競争条件に入ってから最初のインタラクション(図2B 1st試行, 矢印)に至るまでは非競争条件時のペダル回転数(図2B 点線: 約60 rpm)を維持できていたが、競争他者との最初のインタラクション以降は持続的にペダル回転数が減少した。

ラクション以降は持続的にペダル回転数が減少した。

2. 2 競争条件・非競争条件における生理学的パラメータの比較

次に、競争条件における他者とのインタラクションが生理学的応答に及ぼす影響について検討した。非競争条件と競争条件における呼吸率、動脈血圧(収縮期血圧, 平均血圧, 拡張期血圧)、心拍数のブロックの平均値を計算し比較した。その結果、呼吸率(非競争: 19.0 ± 2.9 回/分, 競争: 19.3 ± 1.5 回/分, $p = 0.76$), 収縮期血圧(非競争: 124.8 ± 11.9 mmHg, 競争: 124.0 ± 11.7 mmHg, $p = 0.39$), 平均血圧(非競争: 88.5 ± 10.9 mmHg, 競争: 87.4 ± 9.9 mmHg, $p = 0.50$), 拡張期血圧(非競争: 75.8 ± 8.4 mmHg, 競争: 73.2 ± 6.7 mmHg, $p = 0.06$)は条件間で有意な差は見られなかった(図3A, B), 心拍数は競争条件において非競争条件よりも有意に高い値を示した(図3C; 非競争: 82.5 ± 9.0 bpm, 競争: 84.1 ± 9.9 bpm, $p = 0.04$, Wilcoxon符号順位検定)。

2. 3 競争条件における他者とのインタラクションと運動中の呼吸変動の相互相関

ここまで、非競争条件と競争条件における運動パフォーマンスと生理学的応答尺度について結果を示してきたが、競争場面においてもパフォーマ

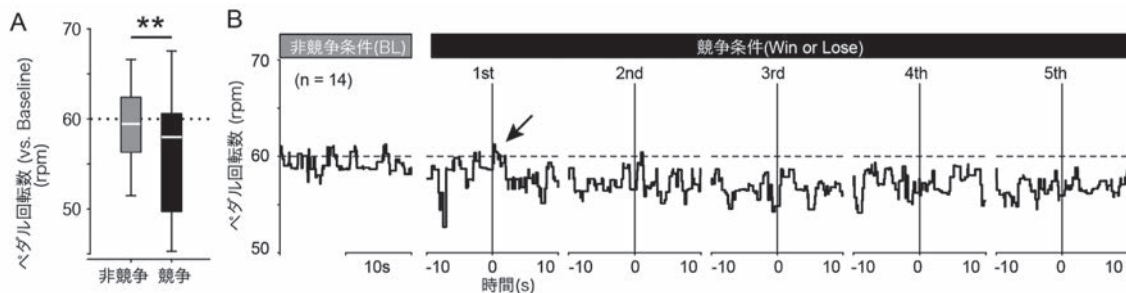


図2 競争条件と非競争条件におけるペダル回転数の比較

(A) 競争/非競争条件におけるペダル回転数, (B) 非競争条件から競争条件への切り替わりに伴うペダル回転数の推移. 条件の切り替わりから最初の他者とのインタラクションの後にペダル回転数が減少した(矢印). ** $p < 0.01$, Wilcoxon符号順位検定

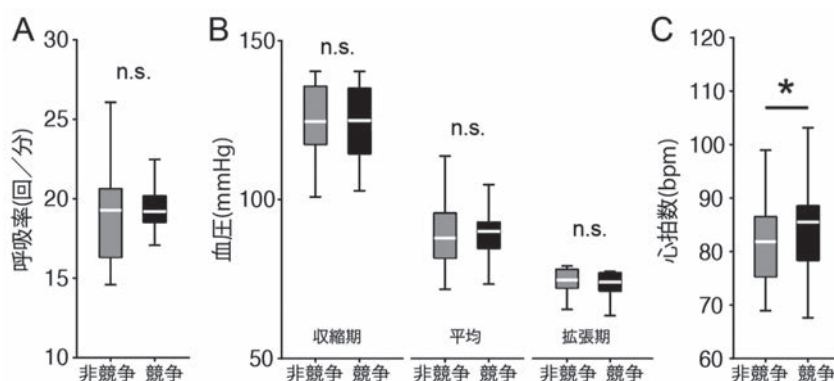


図3 競争条件と非競争条件における生理学的パラメータの比較
 (A) 呼吸率, (B) 血圧:収縮期血圧, 平均血圧, 拡張期血圧, (C) 心拍数
 * $p < 0.05$, Wilcoxon符号順位検定

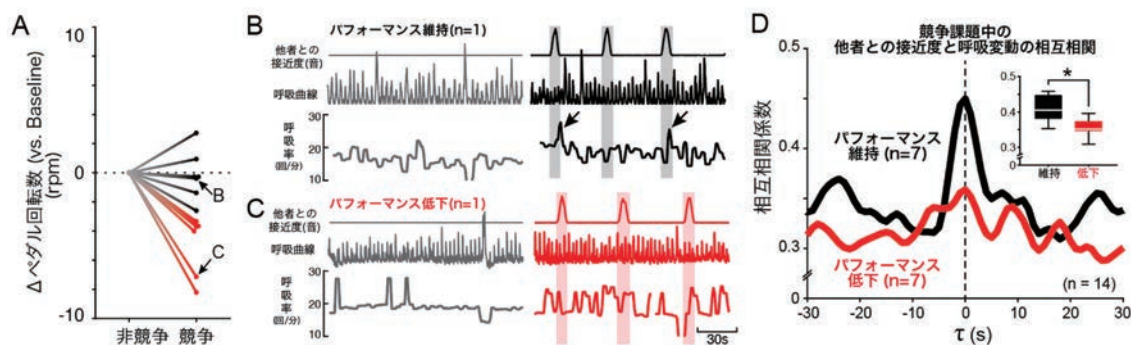


図4 競争条件におけるパフォーマンス低下の個体差と他者接近時の呼吸変動
 (A) 競争条件と非競争条件におけるペダル回転数変化の個人差. 競争条件においてもパフォーマンスを維持した群 (黒線: パフォーマンス維持群, $n=7$) とパフォーマンスが低下した群 (赤線: パフォーマンス低下群, $n=7$) に分類した. (B) パフォーマンス維持群 ($n=1$) の非競争条件 (左図) と競争条件 (右図) における他者との接近度, 呼吸曲線および呼吸率, (C) パフォーマンス低下群 ($n=1$) の非競争条件 (左図) と競争条件 (右図) における他者との接近度, 呼吸曲線および呼吸率, (D) 競争条件中の他者との接近度と呼吸変動の相互相関係数. タイムラグ (τ) 0 時点の相互相関係数のピーク値の比較. * $p < 0.05$, Wilcoxon 順位検定.

ンスを維持するにはどのようにしたら良いのであろうか. この問題に取り組むため, 競争条件においても比較的パフォーマンスを一定に維持することができた実験参加者 (図4A 黒線: パフォーマンス維持群, 7/14名) と, 競争条件においてペダル回転数が減少した実験参加者 (図4A 赤線: パフォーマンス低下群, 7/14名) に分類した.

図4BおよびCに, パフォーマンス維持群 (図4B) およびパフォーマンス低下群 (図4C) の非競争条件 (左図)・競争条件 (右図) における他者との接近度 (他者の自転車走行音), 呼吸曲線, 呼吸率データの一部 (競争条件: Winブロック, 2

分30秒間) を示した. 各群の実験参加者はともにこの競争条件の期間, 3回の他者追い抜き場面を経験したが, パフォーマンス維持群は3試行中2回の試行で顕著な呼吸率の増加が観察された (図4B右, 矢印). 一方で, パフォーマンス低下群の呼吸率はブロックの間で変動はしているものの他者とのインタラクションのタイミングにロックした顕著な呼吸率変動の頻度は低い傾向にあるように見られた (図4C右).

この競争他者とのインタラクションと呼吸応答の関係についてさらなる検討を行うため, 他者との接近度 (競争他者の自転車走行音) と競争条件

と非競争条件の呼吸率の差を絶対値に変換した「呼吸変動」の間の相互相関解析を行った(研究方法を参照)。その結果、パフォーマンス維持群はパフォーマンス低下群よりも有意に高い相互相関関数のピーク値を示した(パフォーマンス維持群： $r = 0.44 \pm 0.12$ ，パフォーマンス低下群： $r = 0.36 \pm 0.03$ ， $p = 0.01$ ，Wilcoxon順位和検定)。

3. 考 察

本研究課題において、VRを用いたサイクリング競争場面を作成し、競争他者の振る舞いを仮想的に完全にコントロールすることによって、競争他者が自己の運動パフォーマンスおよび自律神経性応答をはじめとした生理学的応答尺度にどのような影響を及ぼすか、について比較・検討可能な実験環境を開発した(図1)。

本研究における行動課題は、実験参加者に「一定速度(60 rpm)でサイクリング運動を行うこと」を要求しているため、どの程度60 rpmで一定にサイクリング運動できたかどうかパフォーマンスの尺度となる。その結果、非競争条件と比較して、競争条件においてペダル回転数の有意な低下が観察された(図2A)。このパフォーマンスの低下は運動持続時間の進行に伴って徐々に出現したというよりも、競争条件において他者と初めてのインタラクションを経験したタイミングで生じた(図2B 1st 試行)。このような結果は、ペダル回転数の減少が、単なる運動時間の増加に伴う運動性の疲労というよりも、競争他者とのインタラクションによって惹起されたものである可能性を示唆する。

また、課題中の心拍数は競争課題の方が非競争課題よりも有意に高い値を示した(図3C)。心拍数の値そのものは両条件ともに80~90 bpm程度であり、運動強度としては低強度であったと考えられる。このような低強度の一定運動実行において、運動出力(ペダル回転数)は一定あるいは低下し

ているのに対し、心拍数は上昇しているという結果は、一定強度の運動(ペダル回転数)を発揮するのに必要なコスト(心拍数)が増大したということによって運動効率が低下している(相対的な運動強度の上昇)と解釈することができる。このようなパフォーマンスに対するコストの増大は認知資源の消費に伴う中枢性疲労によって生じた可能性が考えられる。

「抜く」または「抜かれる」という視覚刺激は競争における優劣を決める要因の一つであり、先行研究においてこのような競争時の優劣がポジティブ(快情動)あるいはネガティブな感情(不快情動)の惹起、ならびに生理応答にも影響を及ぼすことが知られている^{2,5,6)}。したがって、競合する他者が存在するという事は、競争他者がどのような振る舞いをするのかという感覚情報の処理・注意制御に加え、情動反応の制御など、自己の認知資源(Cognitive resource)をより多く消費することによって中枢性疲労をもたらした可能性がある。感覚運動統合や注意の制御といった機能は大脳皮質の前頭前野をはじめとする脳領域によって実現されている実行機能の一つであり⁷⁾、一過性の運動によってこの実行機能に影響を受けることも報告されている⁸⁾。一方で、情動反応の制御については扁桃体など大脳辺縁系の脳領域が関与することが知られている。扁桃体は内側前頭皮質と相互的な機能接続を有し、社会的な刺激の処理にも関与する⁹⁾。このような大脳皮質および大脳辺縁系領域が、競争課題においてどのような役割を担っているのかについては今後のさらなる研究が必要である。

興味深いことに、競争条件時にペダル回転数を維持したパフォーマンス維持群において、他者とのインタラクションと呼吸変動の間に有意な相互相関が観察された(図4)。その一方で、運動パフォーマンス低下群はそのような競争他者とのインタラクションと呼吸変動の間に顕著な相互相関

ピークが検出されなかった。これらの結果は、運動パフォーマンスは他者の影響を受けるが、運動パフォーマンスを維持することができた実験参加者（運動パフォーマンス維持群）は、呼吸運動を調節することによってそのパフォーマンス低下を防止した可能性を示唆する。寝ている間も呼吸は止まらないように自律的な側面を持つ呼吸運動であるが、その神経支配は運動神経によってなされている¹⁰⁾。いわゆるメンタルが強い競技者は他者とのインタラクションの際に呼吸運動を調節している可能性があり、競技中の呼吸応答が競争条件におけるパフォーマンスの差異を生み出すバイオマーカーとしての応用的活用が可能かもしれない。さらには競争他者によって惹起されるネガティブな影響を呼吸運動で改善できるようになれば、新しいメンタルトレーニング法の開発につながることを期待される。

4. まとめ

本研究において、VRを用いた比較的低運動強度の競争場面であっても競争他者が自己の運動パフォーマンス（ペダル回転数）および心拍数に影響を及ぼし得ること、また競争場面においてもパフォーマンスを維持できる競技者とパフォーマンスが低下してしまう競技者の違いとして呼吸運動がカギを握っている可能性を見出すことができた。

スポーツ競技はアスリート本人のみならず、競争相手、審判および観客まで含めて成り立っている。したがって、アスリートがベストパフォーマンスを発揮するためには、その要因は自己だけでは完結せず、他者も含めて検討する必要がある。本研究成果によって、競争他者が自己の生理応答およびパフォーマンスに及ぼす影響を特徴化することで、アスリートが他者から受ける影響の程度を定量的なバイオマーカーとして計測できる可能性がある。このバイオマーカーの活用は新しいメ

ンタルトレーニングの開発につながると期待される。

謝 辞

本研究に対して、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に、また本実験に参加して下さった実験参加者、関係者の方々に心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) Oliveira-Silva I., Silva V.A., Cunha R.M., Foster C.: Autonomic changes induced by pre-competitive stress in cyclists in relation to physical fitness and anxiety. *PLoS One*, 13: e0209834 (2018)
- 2) Yamaguchi D., Tezuka Y., Suzuki N.: The differences between winners and losers in competition: the relation of cognitive and emotional aspects during a competition to hemodynamic responses. *Adapt. Hum. Behav. Physiol.*, 5: 31-47 (2019)
- 3) Ricarte J., Salvador A., Costa R., Torres M.J., Subirats M.: Heart rate and blood pressure responses to a competitive role-playing game. *Aggr. Behav.*, 27: 351-359 (2001)
- 4) 香月 翔太, 河村 剛光, 和気 秀文, 山中 航: VRサイクリング運動時の競争他者によって誘発される情動変化が運動パフォーマンスおよび自律神経応答に及ぼす影響. 映像メディア学会技術報告, 44: HI2020-2074 (2020)
- 5) Costa R., Salvador A.: Associations between success and failure in a face-to-face competition and psychobiological parameters in young women. *Psychoneuroendocrinology*, 37: 1780-1790 (2012)
- 6) Gonzalez-Bono E., Salvador A., Serrano M.A., Ricarte J.: Testosterone, cortisol, and mood in a sports team competition. *Horm. Behav.*, 35: 55-62 (1999)
- 7) Funahashi S.: Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neurosci. Res.*, 39: 147-165 (2001)
- 8) Hillman C.H., Snook E.M., Jerome G.J.: Acute cardiovascular exercise and executive control function. *Int. J. Psychophysiol.*, 48: 307-314 (2003)
- 9) Gangopadhyay P., Chawla M., Dal Monte O., Chang

S.W.C.: Prefrontal-amygdala circuits in social decision-making. *Nat. Neurosci.*, (2020)

10) 本間 生夫, 帯津 良一. 情動と呼吸 —自律系と呼吸法—: 朝倉書店, (2016)