

持久性アスリートおよび球技系アスリートにおける起床時の 心拍変動を用いたコンディショニング

高山史徳¹⁾, 米山暁夫¹⁾, 鍋倉賢治²⁾

¹⁾ 株式会社 KDDI 総合研究所

²⁾ 筑波大学体育系

キーワード: トレーニング, ストレス, 回復, 自律神経, 副交感神経

【要約】

心拍変動は、心臓の拍動間隔のゆらぎと定義され、非侵襲的に自律神経機能を評価できることから注目を集めている。心拍変動に関する指標の中でも、副交感神経の活性度を表す Ln RMSSD (Logarithm of Root Mean Square of Successive Differences of RR intervals) は、自律神経機能の回復状態や、トレーニングによる身体の適応状況のモニタリングに有用とされている。本総説では、近年におけるアスリートを対象とした心拍変動を用いたコンディションの評価方法のトレンドを概説する。そのうえで、主に起床時に測定された Ln RMSSD に着目し、運動やトレーニングが心拍変動に与える影響、トレーニング効果と心拍変動との関係、心拍変動に影響を与えるトレーニング以外の要因、心拍変動を用いたトレーニング戦略について議論する。そして、最後に今後の研究の必要性和方向性、スポーツ現場への示唆を述べる。

スポーツパフォーマンス研究, 12, 703-721, 2020 年, 受付日: 2020 年 6 月 22 日, 受理日: 2020 年 11 月 11 日

責任著者: 高山史徳, 356-8502 ふじみ野市大原 2-1-15

fu-takayama@kddi-research.jp

Conditioning athletes engaging in endurance or ball game sports by monitoring morning heart rate variability

Fuminori Takayama¹⁾, Akio Yoneyama¹⁾, Yoshiharu Nabekura²⁾

¹⁾ KDDI Research, Inc.

²⁾ University of Tsukuba

Key words : training, stress, recovery, autonomic nerves, parasympathetic nerves

【Abstract】

“Heart rate variability” is defined as fluctuations in the time intervals between adjacent

heartbeats. This measure has recently attracted attention because it can be used as a non-invasive method for evaluating autonomic nervous function. Among the indices relating to heart rate variability, Ln RMSSD (Natural Logarithm of the Root Mean Square of Successive Differences of RR intervals), which is a measure of the activity of the parasympathetic nerves, is considered to be useful for monitoring the recovery of autonomic nervous function and the adaptation of the body due to training. The present article reviews recent trends in methods of evaluating athletes' conditioning by measuring heart rate variability, focusing on Ln RMSSD measured at the time when waking up, and discusses influences of exercise and training on heart rate variability, relationships between training effects and heart rate variability, factors other than training that may influence heart rate variability, and heart rate variability guided training. Finally, we demonstrate the necessity and direction of future research and suggestions for sports field.

I. はじめに

心拍変動(Heart Rate Variability: HRV)は、心臓の拍動間隔のゆらぎと定義され、非侵襲的に自律神経機能を評価できる(Berntson et al., 1997). HRV の指標の中でも、連続した RR 間隔の差の 2 乗平均平方根(Root Mean Square of Successive Differences of RR intervals: RMSSD)は、自律神経機能の回復状態や、トレーニングによる身体の適応状況のモニタリングに有用とされており、オリンピックやパラリンピックのメダリストのコンディショニングにも活用されている(Edmonds et al., 2015; Flatt and Howells, 2019).

本総説では、はじめに近年におけるアスリートを対象とした HRV を用いたコンディションの評価方法のトレンドを概説する。そのうえで、主に起床時に測定された対数変換した RMSSD (Logarithm of RMSSD: Ln RMSSD)によって HRV を評価した先行研究をもとに、運動やトレーニングが HRV に与える影響、トレーニング効果と HRV との関係、心拍変動に影響を与えるトレーニング以外の要因、HRV を用いたトレーニング戦略について議論する。そして最後に、今後の研究の必要性和方向性、スポーツ現場への示唆を述べる。本稿の主なターゲットは、陸上競技中長距離走、トライアスロンをはじめとする持久性スポーツに加え、持久力が競技パフォーマンスと関係するサッカーなどの球技系スポーツに取り組むアスリートやストレングス&コンディショニングコーチ、フィットネスコーチおよびフィジカルコーチとし、彼らに有益な資料を提供することを目的とする。なお、本総説は、ナラティブレビューであり、著者らの知識の範囲内で先行研究を引用する。

近年におけるスポーツ科学の研究では、P 値によって決定される統計学的有意差の有無よりも、効果量(Effect size: ES)や Magnitude Based Inference (MBI)をもとに判断している論文が多い。本稿では、引用した先行研究で報告されている相関係数については、統計学的有意差の有無ではなく、効果量(0-0.3: small, 0.31-0.49: moderate, 0.5-0.69: large, 0.7-0.89: very large, 0.90-1.00: near perfect)をもとに判断する(Hopkins et al., 2009)。また、変化の大きさについては、ES や MBI の結果も可能な限り明記した。MBI とは、予め設定された最小有効変化(Smallest Worthwhile Change: SWC)に対して、変化量の信頼区間がどこに位置しているのかを口語的な解釈を含めて変化の確率(Percentage likelihood)で示すものである(例えば、0.5%未満: most unlikely or almost certainly not, 0.5%-5%: very unlikely, 5%-25%: unlikely or probably not, 25%-75%: possibly, 75%-95%: likely or probably, 95%-99.5%: very likely, 99.5%以上: most likely or almost certainly) (Hopkins et al., 2009)。MBI の詳細は、永原(2019)を参照されたい。

II. HRV を用いたコンディションの評価方法

HRV を用いた自律神経機能の解析方法は、時間領域解析、周波数領域解析および非線形解析の 3 つに大別される。このうち、かつてのスポーツ科学の研究では、実験室にて心電図を用いた上で比較的長時間にわたって測定し、得られた RR 間隔を周波数領域解析にかけ、自律神経系の活性状況を詳細に検証するものが多かった(Hedelin et al., 2000; Iellamo et al., 2002; Uusitalo et al., 2000)。しかし、近年諸外国のスポーツ界では、時間領域解析の一指標であり、副交感神経の活性度を表す RMSSD を代表的な評価指標とし、主に起床直後の安静時(以下、起床時とする)に仰臥位あるいは座位にて短時間での測定値が利用されている。以下に近年のトレンドを述べる。なお、RMSSD は、データ

の歪み (Skewed nature) を踏まえ、対数変換した値 (Ln RMSSD) をもとに評価される場合が多い。本稿では、引用した論文において RMSSD をもとに副交感神経の活性度を評価していた場合、そのまま表記したものの、Ln RMSSD と同等の指標として扱った。また、起床時以外に測定された場合、その測定条件を明記した。

アスリートの自律神経機能の回復状態やトレーニングによる適応状況のモニタリングとして Ln RMSSD が優れている理由としては、呼吸数による影響を受けにくいことや (Saboul et al., 2013)、短時間測定における妥当性に優れることが挙げられる (Al Haddad et al., 2011; Flatt and Esco, 2016b; Holmes et al., 2020a; Krejčí et al., 2018; Nakamura et al., 2017; Rabbani et al., 2019)。Saboul et al. (2013) は、10 名の男性ランナーを対象として、21 日間にわたり呼吸数を規定した条件と制限しなかった (自発呼吸) 条件で HRV を測定した結果、High frequency 成分や Low frequency 成分といった周波数領域解析の指標は呼吸パターンによる影響を顕著に受けた一方、RMSSD は条件間で very large な相関関係があったことを明らかにした ($r = 0.78$)。短時間測定における妥当性については、HRV 指標の定量には数分の安定化時間 (Stabilization period) を設けた上で、5 分間測定する (例えば安定化時間が 5 分の場合、5-10 分間に測定) という Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996) の推奨がある。この推奨のもとに、多くの研究は、5-10 分で測定された数値を基準値とし、より短時間での測定値との一致度の観点で妥当性を検証しており、いずれも Ln RMSSD の有用性が認められている (Flatt and Esco, 2016b; Holmes et al., 2020a; Krejčí et al., 2018; Nakamura et al., 2017; Rabbani et al., 2019)。例えば、Krejčí et al. (2018) は、持久性アスリートを対象として、起床時仰臥位での Ln RMSSD および心拍数 (Heart Rate: HR) は、1 分間の安定化時間を設けた後 1 分間測定 (1-2 分に測定) することで十分な妥当性が確保できると報告している。このような従来よりも短時間での HRV 測定は、超短 HRV 分析 (Ultra-short HRV analysis) と呼ばれている (Pecchia et al., 2018)。

次に測定姿勢について述べる。Holmes et al. (2020a) は、仰臥位、座位および立位のそれぞれの姿勢で 1-2 分と 5-10 分における測定値を比較した。その結果、いずれの姿勢においても超短 HRV 分析で Ln RMSSD は十分な妥当性が確保できるものの、数値自体には姿勢間での差があることを報告している (仰臥位: 3.88 ± 0.80 ms, 座位: 3.37 ± 0.63 ms, 立位: 2.86 ± 0.72 ms, 平均値 \pm 標準偏差)。一方、具体的な数値は示されていないものの、立位姿勢では継続的な測定実施率が低下することが指摘されており (Plews et al., 2017a)、スポーツ現場でアスリートが継続利用する上では、仰臥位や座位での測定が実践的だと言われている (Buchhet, 2014)。また、仰臥位での測定は、特に HR が低い持久性アスリートでは飽和現象によって Ln RMSSD のみでの解釈が困難となる場合や、測定中にアスリートが眠りに落ちる可能性も指摘されている (Buchhet, 2014)。したがって、アスリートを対象とした HRV の測定姿勢は、座位が最も適切だと考えられるものの、長期的に測定を続ける上で最も負担が少ない姿勢を各々選択した上で、日々の条件を統一することが望ましい。また、チーム内で複数のアスリートを対象とした場合、異なる姿勢で測定された Ln RMSSD の数値そのものを比較することには注意すべきである。

次に測定頻度について述べる。持久性アスリートを対象とした先行研究によると、週 1 回の HRV 測定ではコンディションや持久性パフォーマンスの変化を正確に評価できないと指摘されている (Le Meur

et al., 2013; Plews et al., 2012, 2013a, 2014b). Plews et al. (2013a) は, 10 名のレクリエーションランナーを対象として, 9 週間のトレーニング前後の Ln RMSSD と 10 km 走のタイムの変化率を検証した結果, 週に 1 回の測定値 (Ln RMSSD day) を用いると相関係数が small ($r = -0.17$) であったが, 1 週間で測定された Ln RMSSD の平均値 (Mean Ln RMSSD) を用いた場合, very large ($r = -0.76$) となったことを報告している. また, Plews et al. (2014b) は, Ln RMSSD と長距離走パフォーマンスとの縦断的関係をもとに, トレーニングによる適応をモニタリングする上ではエリート持久性アスリートでは最低でも週 3 回, レクリエーションランナーでは最低でも週 5 回の測定が必要なことを示唆している. なお, レクリエーションランナーでより多くの測定頻度が求められる理由は, 測定値の日々の変動が大きいためである. さらに, 非機能的オーバーリーチングと評価されたエリートトライアスリートを対象とした事例研究によると, Ln RMSSD day を用いると通常通りのトレーニングが実施できた期間でも全ての週で SWC を超える低下を示していた (Plews et al., 2012). この結果をもとに彼らは, 週に 1 回の測定値 (Ln RMSSD day) ではなく, Mean Ln RMSSD や 7 日間の移動平均 (7-day rolling Ln RMSSD) を用いて傾向を観察することで, アスリートのコンディションをより正確に評価できると指摘している. また, 特にエリートアスリートでは Mean Ln RMSSD よりも, 週当たりの副交感神経の活性度のバラつきを表す変動係数 (Coefficient of variation of Ln RMSSD: CV Ln RMSSD) がコンディションや持久性パフォーマンスの変化をより鋭敏に反映することも指摘されている (Flatt and Esco, 2014; Flatt and Howells, 2019; Mitsuka et al., 2020). この CV Ln RMSSD を算出するためには, 週当たり複数回の測定が必要不可欠である.

以上を踏まえると, HRV をコンディション指標として有効活用するためには, アスリート自らが普段の生活環境において簡便かつ日常的に測定できることが重要である. この点, 海外製ではあるものの, Elite HRV, HRV4 Training および ithlete といったスマートフォンアプリケーションは, 電極センサー搭載の胸ベルト型の心拍計や光電式容積脈波記録法のセンサーを用いて測定することで, 測定終了後直ちに Ln RMSSD あるいは RMSSD が表示され, 諸外国のスポーツ現場で広く活用されている (Flatt and Esco, 2013; Perrotta et al., 2017; Plews et al., 2017b).

なお, 睡眠時に測定された HRV をもとにアスリートの副交感神経の活性度を評価した研究は近年でも数多く報告されているものの (Costa et al., 2018; Hynynen et al., 2010; Sekiguchi et al., 2019; Thomas et al., 2020), 睡眠ステージの違いが HRV に影響を及ぼすことや, ノイズが多く日常的にアスリートが実施する上で障壁が高く, 有用性に限界があるとされている (Buchheit, 2014).

III. 運動やトレーニングが HRV に与える影響

本章では一過性の運動やトレーニングによる HRV への影響に関する先行研究を概説する. 自律神経は, 心臓の拍動や呼吸, 消化, 発汗, 体温調節などの全身諸器官の働きを調整している. したがって, アスリートが日々行うトレーニングによって HRV が変化することは容易に想像できる. Plews et al. (2014a) は, オリンピックメダリストを複数名含む 9 名の男子エリートボート選手を対象として, 週毎のトレーニング強度の配分と Mean Ln RMSSD との関係を検証した. その結果, 高強度トレーニング (血中乳酸蓄積開始点以上に相当) が増えると Mean Ln RMSSD が減少する一方 (ES = small, MBI = possibly), 低強度トレーニング (乳酸性閾値未満に相当) が増えると Mean Ln RMSSD は増加する傾向を確認した

(ES = small, MBI = possibly). Stanley et al. (2013) のレビューによると, 1 回の運動後における副交感神経の活性度の回復に必要な時間は, 低強度では 24 時間以内, 中強度(乳酸性閾値から血中乳酸蓄積開始点に相当)では 24-48 時間, 高強度では最低でも 48 時間とされている. Stanley et al. (2013) は, 運動強度が運動後の副交感神経の活性度に与える影響について, 一過性の低強度の持久性運動後 24 時間以内には副交感神経の活性度は一時的に高まることもあり, その原因としては血漿量増加による圧反射刺激が関与していると考察している. 一方, より高強度の運動では血中アシドーシスや血中乳酸, 血漿エピネフリン, 体温の増加および代謝産物の蓄積といった生理学的メカニズムによって一過性に副交感神経の活性度が抑制される可能性がある(Plews et al., 2014a).

トレーニングの量や負荷(強度と量によって構成)が大幅に増加した際にも Ln RMSSD が減少する場合もある(Flatt et al., 2017a, 2017b; Kamandulis et al., 2020; Noon et al., 2018). 思春期の競泳選手 22 名を対象として 11 週間にわたり HRV を測定した Kamandulis et al. (2020) によると, 3-5 日間にわたり連続してトレーニング量が増加すると, Ln RMSSD が有意に減少していた($4.52 \pm 1.91 \text{ ms} \rightarrow 4.32 \pm 1.73 \text{ ms}$, 平均値 \pm 標準偏差). また, 10 名の大学生競泳スプリント選手(男性:7 名, 女性:3 名)を対象として, 選手権大会に向けた 5 週間(ベースライン期間:1 週間, 過負荷期間:2 週間, テーパリング期間:2 週間)の HRV を測定した研究では, 過負荷期間の Mean Ln RMSSD は減少し(ES = moderate), CV Ln RMSSD が増加していた(ES = moderate) (Flatt et al., 2017b).

トレーニングに対する Ln RMSSD の変化は, アスリートの持久性パフォーマンスや競技レベルにも影響を受ける(Flatt et al., 2017a, Plews et al., 2014b). Plews et al. (2014b) の報告によると, CV Ln RMSSD はエリート持久性アスリートでは 5-7%, レクリエーションランナーでは約 10%であった. Flatt et al. (2017a) は, 同一チームに所属する 10 名の女子大学生サッカー選手の春季トレーニング(戦術練習, レジスタンストレーニングおよび持久性トレーニングによって構成)期間中における CV Ln RMSSD は, 最大酸素摂取量(Maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2\text{max}}$) ($r = -0.61$), Yo-Yo テストのパフォーマンス($r = -0.65$)と Large な負の相関関係であったと報告している. この知見は, トレーニング負荷に対する副交感神経の活性度の変動は, 持久性パフォーマンスに優れる者ほど小さい傾向を示唆している.

一方, 持久性アスリートの場合, 数週間にわたりトレーニング負荷が大幅に増加(約 30-40%)すると, 副交感神経の活性度が過度に高まり, Ln RMSSD が増加する場合もある(Bellenger et al., 2016; Le Meur et al., 2013). トライアスリートを対象とした報告では, 3 週間の過負荷期間(通常のトレーニング負荷より 40%増加)後, Mean Ln RMSSD が増加していた(ES = small, MBI = almost certainly) (Le Meur et al., 2013). 同様に, 15 名の男性ランナー・トライアスリートを対象とした研究でも, 14 日間の過負荷期間後の Mean Ln RMSSD は増加していた(MBI = very likely) (Bellenger et al., 2016). この二つの先行研究では, 過負荷期間におけるトレーニングによって, 疲労度やストレス, Daily Analysis of Life Demands for Athletes といった主観的指標も悪化していたとともに, 持久性パフォーマンスにも低下が認められていた(Bellenger et al., 2016; Le Meur et al., 2013). 一般的に持久性パフォーマンスが向上した際, Mean Ln RMSSD は増加している場合が多い. しかし, 持久性アスリートにおいては, トレーニング内容によって Mean Ln RMSSD が増加していても, 持久性パフォーマンスは低下している場合もある. このような場合, 主観的指標を併せてモニタリングすることで, HRV による誤った解釈を防ぐこと

が出来る」と指摘されている(Bellenger et al., 2016; Mitsuka et al., 2019).

IV. トレーニング効果とHRVとの関係

持久性パフォーマンスとLn RMSSDあるいはRMSSDとの縦断的關係を検証した研究より、持久性アスリート、球技系アスリートのいずれにおいても、持久性パフォーマンスが向上した際、副交感神経の活性度は高まっている場合が多い(Buchheit et al., 2010; Da Silva et al., 2014; de Freitas et al., 2015; Esco et al., 2016; Flatt and Esco, 2016a; Ornelas et al., 2017). 例えば、Buchheit et al. (2010) は、14名の男性レクリエーションランナーを対象として、8週間のトレーニング前後におけるMean Ln RMSSDと10 km走のタイムの変化率の間にvery largeな負の相関關係を報告している($r = -0.73$). この結果は、副交感神経の活性度が高まったランナーほど持久性パフォーマンスが向上していた傾向を示している. 一方、簡単に勝利できると予想されたレースで途中棄権となり、その後に非機能的オーバーリーチングと評価され、帯状疱疹にも罹患したエリートトライアスリートは、レース前48日間の7-day rolling Ln RMSSDが徐々に減少していた(Plews et al., 2012).

女子大学生サッカー選手12名を対象としたFlatt and Esco (2016a)の研究では、5週間のオフシーズン前後のYo-Yoテストのパフォーマンスと1-3週のMean Ln RMSSDの変化量(Δ Mean Ln RMSSD)との間にLargeな相関關係を認めている($r = 0.50$). 9名の女子大学生サッカー選手を対象とした報告においても、11週間のオフシーズン前後の $\dot{V}O_2\max$ の変化量は、1-3週の Δ Mean Ln RMSSDとの間にnear perfectの相関關係が認められている($r = 0.90$) (Esco et al., 2016). これらの球技系アスリートを対象とした先行研究は、オフシーズンをとおした持久性パフォーマンスの変化は、オフシーズン初期のLn RMSSDによって予測できる可能性を示唆している.

いくつかの先行研究では、CV Ln RMSSDが持久性パフォーマンスの変化と密接な關係を持つことを報告している(Flatt and Esco, 2014; Flatt and Howells, 2019; Mitsuka et al., 2020). Flatt and Howells (2019) は、男子ラグビーセブンス代表選手12名を対象として、2016年リオデジャネイロオリンピック前の準備期3週間(ベースライン:1週, 強化期:2-3週)の最大有酸素性スピードの変化は、2週目のCV Ln RMSSDとvery largeな負の相関關係であったことを報告した($r = -0.74$). この結果は、トレーニング負荷が増加した際、副交感神経の活性度のバラつきが小さい選手ほど、持久性パフォーマンスが向上していた傾向を示している. 興味深いことに、この報告ではMean Ln RMSSDと最大有酸素性スピードとの間には顕著な關係は認められていない. また、Flatt and Esco (2014) は、男子大学生クロスカントリーランナー1名を対象として、9週間にわたるHRVと8 kmレースのパフォーマンスとの關係を検証した結果、レースタイムとの相関關係はMean Ln RMSSDでlarge($r = -0.60$)であったが、CV Ln RMSSDとはnearly perfectであった($r = 0.92$).

一方、エリート持久性アスリートを対象とした事例研究では、前述した例とは異なり、たとえ競技で優れたパフォーマンスを発揮できたとしても、その競技までのトレーニング期間におけるMean Ln RMSSDは増加していなかったことが報告されている(Mitsuka et al., 2020, Plews et al., 2012; Stanley et al., 2015). 男子大学院生中距離ランナー1名を対象として、2シーズンにわたりHRVを測定した研究では、1500 mのタイムが約3秒短縮していたのにも関わらず(3分49秒10→3分46秒33), Mean Ln RMSSDは増加していなかった(4.63 ± 0.11 ms→ 4.59 ± 0.14 ms, 平均値 \pm 標準偏差) (Mitsuka et al.,

2020). そればかりか、重要な競技会前には Ln RMSSD が減少している事例もあり、これはテーパリング期によるトレーニング負荷の減少や競技(試合)に向けた精神的なストレスも影響した結果(readiness to perform)と考えられている(Plews et al., 2013b). 実際、男子エリートトライアスリート1名を対象として、32週間にわたり HRV を測定した研究によると、優れたパフォーマンスを発揮できたレース前の Ln RMSSD は減少傾向にあった(Stanley et al., 2015).

以上を鑑みると、持久性パフォーマンスが向上した際、Mean Ln RMSSD は増加している場合が多い。また、競技レベルの高いアスリートの場合、Mean Ln RMSSD よりも CV Ln RMSSD が持久性パフォーマンスの変化と関係している場合もある。しかし、特にエリート持久性アスリートの場合、競技パフォーマンスと Ln RMSSD との関係は、トレーニング期などによっても異なり、より複雑である。

V. HRV に影響を与えるトレーニング以外の要因

Ln RMSSD は、トレーニング以外の様々な要因の影響を受ける。最近、非アスリートを対象とした系統的レビューおよびメタ分析にて、心的外傷後ストレス障害の患者は、健常成人に比べると安静時の RMSSD が有意に低いことが明らかとなった(Ge et al., 2020)。また、58名の研修医を対象とした報告では、24時間のオンコール勤務の者は、そうでなかった者(コントロール群)に比べて唾液中のコルチゾールや主観的な気分の変化が著しかった上、午前8時から測定された Ln RMSSD は有意に減少していた(オンコール勤務: 4.63 ± 0.14 ms \rightarrow 3.93 ± 0.12 ms, コントロール群: 4.73 ± 0.21 ms \rightarrow 4.72 ± 0.18 ms, 平均値 \pm 標準偏差)(Morales et al., 2019)。これらのスポーツ科学以外の先行研究で報告されている知見は、日常生活で生じる様々なストレスによっても副交感神経の活性度が下がることを示している。

Flatt et al. (2018) は、男子大学生競泳スプリント選手を対象として、4週間にわたりトレーニング負荷の変動を抑えた上で、HRV と主観的指標(睡眠、疲労度、筋痛、ストレス、気分について9段階で回答)を測定し、Ln RMSSD との関係を検証した。その結果、17名中15名の選手が少なくとも一つの主観的指標と Ln RMSSD との間に有意な相関関係を有していた。この結果に基づき彼らは、要因を特定するために、アスリートと直接コミュニケーションを取りながら、Ln RMSSD と関係の深い主観的指標を注視する必要性を述べている。

男子大学院生中距離ランナーを2シーズンにわたり追跡した事例研究では、競技パフォーマンスが低下する前に CV Ln RMSSD は増加しており、この原因としては、学位取得に関わる中間試験、時差を伴う飛行機移動および国際学会での発表といったトレーニング以外のストレスの関与が強かったと考察されている(Mitsuka et al., 2020)。実際、この研究では、CV Ln RMSSD とトレーニング負荷とは small な相関関係($r = 0.219$)であったのに対し、Hooper's score(ストレス、疲労、筋痛、睡眠について7段階で回答し、それらを合計した数値)とは moderate な相関関係($r = 0.487$)であった。

球技系アスリートにおいても、トレーニング以外の要因が Ln RMSSD に影響を与える可能性が示唆されている(Williams et al., 2018)。8名の男子ラグビーセブンス代表選手を対象として、ワールドラグビーセブンスシリーズに向けた準備期間8週間におけるトレーニング負荷(Session RPE法によって定量)と Ln RMSSD との関係 Banister の2次元インパルス応答モデルで検証した研究では、予測された Ln RMSSD と実際の Ln RMSSD の相関係数は高い者では0.78であったが、低い者では-0.24であった

(Williams et al., 2018). この研究の著者らは、予測精度が低かった選手では、トレーニング以外のストレスが Ln RMSSD に影響を与えた可能性があると考えしている。

競技の開催地や重要性によっても副交感神経の活性度は影響を受ける。10名の男子ラグビーセブンス代表選手を対象として国内および国外で開催されたトーナメント期間における HRV を定量した報告によると、試合中の内的・外的負荷にはトーナメント間での明確な差がなかった一方で、Ln RMSSD は国外で開催されたトーナメント期間中でのみ低下していた (ES = moderate-large) (Flatt et al., 2019b)。また、国内リーグに所属する女子サッカーチームの選手を対象とした研究では、対戦相手が上位でかつ上部リーグへの昇格のために重要と位置付けられた試合直前の RMSSD は、ベースラインに比べて有意に低下したものの (72.78 ± 39.69 ms \rightarrow 39.54 ± 18.58 ms, 平均値 \pm 標準偏差), 対戦相手が最下位で既にシーズンの目標が達成されていた試合直前の RMSSD は変化がなかった (42.96 ± 24.91 ms \rightarrow 42.56 ± 16.85 ms, 平均値 \pm 標準偏差) (Ayuso-Moreno et al., 2020)。このような競技前の副交感神経の活性度の抑制は、Precompetitive anxiety と呼ばれており (Cervantes Blásquez et al., 2009), トレーニングによる持久性パフォーマンスへの適応状態やコンディションを評価する上で注意が必要である。

このように、競技レベルの高いアスリートであっても、トレーニング以外の要因によって Ln RMSSD は減少する。時差を伴う飛行機移動の直後に国際レースに出場したエリート車椅子パラアスリートのレース翌日の Ln RMSSD は、ベースライン期間の平均値に比べて大幅な減少 (23.1%) が起きており、多様なストレスが一度に心身にかかった際、副交感神経の活性度が大幅に下がることを示している (Sanz-Quinto et al., 2018)。一方、先行研究で評価されている主観的指標の多くは、トレーニング負荷による影響も受ける (Moalla et al., 2016)。したがって、トレーニング以外の要因と Ln RMSSD との関係を正確に検証できているとは言い難い。アスリートにおけるトレーニング以外の要因が副交感神経の活性度に与える影響については今後の研究が必要である。

VI. HRV を用いたトレーニング戦略

HRV が持久性パフォーマンスと関係するというエビデンスを踏まえ、測定された HRV をもとにその日のトレーニング内容を決定するトレーニング戦略 (HRV-guided training) に関する研究も多い。著者の知る限り、報告されている研究の全てが HRV-guided training によって持久性パフォーマンスが向上したことを明らかにしている (Javaloyes et al., 2019, 2020; Kiviniemi et al., 2007, 2010; Nuuttila et al., 2017; Sanz-Quinto et al., 2019; Schmitt et al., 2018; Vesterinen et al., 2016)。レクリエーションランナーを HRV-guided training 群と規定されたトレーニングを実施する群 (規定群) に割り当て、12 週間にわたりトレーニング実験 (準備期: 4 週間, 鍛錬期: 8 週間) を実施した研究では、3000 m 走の走速度は、HRV-guided training 群のみ有意に向上していた (ES = moderate) (Vesterinen et al., 2016)。また、3000 m 走の走速度が低下した者は、HRV-guided training 群では 13 名中 1 名のみであったが、規定群では 18 名中 5 名いた。

HRV-guided training の効果を報告した多くの研究では、最初の数週間における HRV の測定結果をもとに、個人毎に SWC を算出した上で、その範囲内にある場合のみ高強度トレーニングが行われる (SWC を逸脱した場合、低強度トレーニングあるいは休息日となる)。例えば、Vesterinen et al. (2016)

の研究では、準備期 4 週間の RMSSD の平均値 ± 0.5 標準偏差の範囲を SWC としている。しかし、通常アスリートのトレーニングは、高強度と低強度あるいは休息という単純な選択とはならない。すなわち、高強度トレーニングの中でも様々な変数(強度, 量, 運動-休息比, 反復回数等)が存在する。このようなスポーツ現場における現実を踏まえ、男子大学院生中距離ランナーを対象とした事例研究では、当日の Ln RMSSD が通常より大幅に減少した場合には高強度トレーニングを回避し、Ln RMSSD が少し減少した場合には、高強度トレーニングの内容を微調整するといったトレーニング戦略の有効性を検証した(例:3 分 30 秒/km ペースでの 8 km 持続走→3 分 40 秒/km ペースでの持続走) (Mitsuka et al., 2019)。その結果、このランナーの CV Ln RMSSD は 23 週間の測定期間をとおして小さく(平均値 \pm 標準偏差:4.5 \pm 1.5%), 4 年ぶりに競技パフォーマンスの大幅な向上を果たしたと報告している。

Ⅶ. 今後の研究の必要性と方向性

たとえ日常的にトレーニングをしているアスリートであっても、Ln RMSSD はトレーニング以外の要因の影響を受ける可能性がある。前述した HRV-guided training の効果を検証した Vesterinen et al. (2016) の報告では、鍛錬期 8 週間後にパフォーマンスが唯一低下したレクリエーションランナーは、後半 5 週間では RMSSD が SWC を常に下回っていたため、高強度トレーニングが一度も行えていなかった。彼らは、この RMSSD の減少の原因は、仕事上のストレスであったと言及している。ただし、心理尺度などを用いて具体的に定量されていないため、詳細な検証はされていない。

Hanton et al. (2005) によると、エリートアスリートが自覚するストレス(ストレス要因)は、パフォーマンスに関するものと組織に関するものがある。前者は準備, 傷害, プレッシャー, 対戦相手, 自分自身, 競技(試合)およびジnkスの 7 つ, 後者は環境要因, 個人要因, リーダーシップ要因およびチーム要因の 4 つによって構成される。また、このようなスポーツに関係するストレス以外でも、アスリートによっては学業や仕事, 日常生活でのストレスの影響も考えられる。日本人を対象として生活上の出来事尺度(ライフイベント法)を用いてストレス度(個人が感じるストレスの程度)を調査した夏目(2008)によると、勤務者では配偶者の死, 会社の倒産, 親族の死, 離婚, 夫婦の別居, 会社が変わる, 自分の病気や怪我, 多忙による心身の疲労, 300 万円以上の借金, 仕事上のミスといった項目のストレス度が高かった。同様に、国立大学生を対象とした場合、配偶者の死, 近親者の死, 留年, 親友の死, 100 万円以上のローン, 大学中退, 大きな怪我や病気, 離婚, 恋人(配偶者)との別離, 自己または相手の妊娠といった項目のストレス度が高かった。実際、スポーツ科学におけるいくつかの先行研究でも、日常生活でのストレスが高い状態では、トレーニング効果が損なわれること(Bartholomew et al., 2008), トレーニング後の回復が遅延すること(Stults-Kolehmainen et al., 2014), 持久性パフォーマンスと密接に関係する走の経済性に負の影響を与えること(Otter et al., 2016)が示されている。ただし、これらのいずれの報告も HRV を測定していないため、副交感神経の活性度との関係は不明である。

Table 1 には、Hanton et al. (2005) および夏目(2008)をもとに、アスリートの HRV に影響を与えると考えられるトレーニング以外のストレスを挙げた。しかし、アスリートを対象としてトレーニング以外の要因を定量し、起床時の Ln RMSSD との関係性を詳細に検証した先行研究はない。また、これは著者らの推察の域を脱しないが、トレーニング負荷の大小やアスリートの特徴(年齢, 性別, 競技レベル, 競技経験, 性格, コーピングスキルなど)によってトレーニング以外の要因が HRV に与える影響が異なる

ことも想像できる. したがって今後は, 様々なアスリートを対象に HRV を用いたコンディショニングの実践知を蓄積する必要がある. 具体的には, スレッサーをライフイベント法などの尺度を用いて定量する方法, アスリートが記録する日誌などの情報を分析するアプローチ, 起床時の Ln RMSSD の減少を防ぐ各種方策の有効性の検証などが挙げられる.

Table 1. アスリートの起床時の HRV に影響を及ぼしうるトレーニング以外の要因(例)

大分類	中分類	小分類	具体例
アスリートに 特異的なス レッサー	パフォーマンスに 関するスレッサー	準備	不十分な精神的準備, 不十分な身体的準備
		傷害	傷害のリスク, 昔からの傷害を悪化させるリスク
		プレッシャー	国際大会のプレッシャー, プレッシャー下での 競技
		対戦相手	強いアスリートと戦う, 未知な対戦相手の能力
		自分自身	体格と体型
		競技(試合)	複雑な技術の遂行, 競技の性質
		ジinxス	特定の会場に関する迷信
	組織に関する スレッサー	環境(選考, 金銭面, 練習環境, 宿泊施設, 遠征, 競技環境, 安全 性)	選考の不公平感, 経済的支援の欠如, 過酷な 気象条件, 気の合わないルームメイト, 長時間 移動
		個人(栄養, 傷害, 目 標と期待)	外国料理に対する動揺, 傷害によるフラストレ ーション, 指導者からの非現実的な期待
		リーダーシップ(指導 者, 指導スタイル)	コーチ-アスリート間の緊張, 傷害について非 協力的な指導者, 積極的なコーチング, 優柔 不断なコーチング
チーム(チームの雰 囲気, サポート体制, 役 割, コミュニケーション)		アスリート間の緊張, 親からの不適切なサポ ート, 役割構造の欠如, アスリート間のコミュニケ ーション不足	
アスリートに 非特異的な スレッサー		日常生活	配偶者の死, 親族の死, 離婚, 夫婦の別居, 病気, 借金
		学校生活	留年, 中退, 入試, 就職試験, 卒業論文
		仕事上	会社を変わる, 多忙, 仕事上のミス, 単身赴 任, 人事異動, 上司とのトラブル

Hanton et al. (2005) および夏目 (2008) を参考に作成

VIII. 現場への示唆

ここまで HRV を用いたコンディショニングの有効性について述べてきたが, HRV の活用にはいくつかの注意点がある. Flatt et al. (2019a) によると, 1 回のレジスタンス運動後における Ln RMSSD の経時変化は, カウンタームーブメントジャンプのピークパワーなどの神経筋系の指標とは独立していた. 特に持久性アスリートにおいては, 筋損傷からの回復が不十分な状態でのトレーニングの実施は, 運動強度が低下することによって, トレーニング効果が損なわれる可能性がある(Doma et al., 2017). また, 男子大学生アメリカンフットボールチームを対象として, 13 日間の暑熱環境でのプレシーズン合宿中の Ln RMSSD は後半に有意に増加していたが, これは暑熱馴化に伴う血漿量増加を反映した結果と考えら

れ、トレーニング負荷の蓄積に伴い、主観的指標は合宿後半に悪化していた(Flatt et al., 2020). したがって、アスリートのコンディションは、HRV のみならず、主観的指標、筋損傷指標および神経筋系指標も踏まえて包括的にみることが重要である。これは著者らの推測の域を脱しないが、例えば中長距離走選手やトライアスリートの場合、Ln RMSSD からみた回復状況は十分だが、筋損傷指標からみた回復状況が不十分な場合、着地衝撃などがない自転車運動などによって高強度トレーニングを行うことで、より効果的にパフォーマンスが向上できるかもしれない。また、球技系スポーツにおいては、オフシーズン期間において、Ln RMSSD をもとに個々にトレーニング負荷を調整することで、より多くの選手の持久性パフォーマンスの向上に繋がるかもしれない。

前述したとおり、重要な競技前における Ln RMSSD の減少は、Readiness to perform や Precompetitive anxiety の関与も考えられ、スマートフォンアプリケーションで表示された回復度(スコア)は実際のコンディションを反映していない場合もある。特に競技当日のスコアは、アスリートの精神面にネガティブな影響を与える可能性もあるため、注意が必要である。

HR が低い持久性アスリートの場合、飽和現象と呼ばれる現象によって、みかけ上 Ln RMSSD が減少することがある(Plews et al., 2012, 2013b). このメカニズムとしては、筋細胞レベルでのアセチルコリン受容体の飽和が関係し、持久性トレーニングの適応に伴う現象とも考えられている(Plews et al., 2012, 2013b). したがって、エリート持久性アスリートを対象として HR が低値となる仰臥位で HRV の測定を行う際は、場合によっては RR 間隔との比(LnRMSSD/RR ratio)を踏まえて評価することが推奨されている(Schmitt et al., 2015).

近年では、RR 間隔のゆらぎをリアルタイムに捉え、それを増大させるように訓練する HRV バイオフィードバック(HRV Biofeedback: HRVB)法にも関心が集まっている。HRVB 法の具体的なプロトコルは、研究によって異なるものの、基本的には心拍のゆらぎをコンピュータやスマートフォンなどの画面に映しながら圧受容体反射システムが共鳴を起こす周波数(共鳴周波数)をあらかじめ検索し、その結果をもとに HRV が高まるようペース呼吸を行うものである。これまでのところ、アスリートを対象とした HRVB 法の効果を検証した研究には限りがあるものの、系統的レビューやメタ分析にて有効性が報告されている(Jiménez Morgan and Molina Mora, 2017; Lehrer et al., 2020). Mueller et al. (2020) は、エリート女子大学院生トライアスリートを対象とした事例研究において、HRVB 法の効果を検証している。この研究では 8 週間の期間中、後半の 4 週間でのみ就寝前に 1 回 15 分の HRVB 法が週 5 回行われた。また、RMSSD、トレーニング量および主観的指標(パフォーマンスやエネルギーレベル)が全期間で測定された。その結果、後半の 4 週間で RMSSD は顕著に増加(前半 4 週間:137 ms, 後半 4 週間:191 ms, 中央値)し、変動が小さくなった(前半 4 週間:83-184 ms, 後半 4 週間:142-201 ms, 四分位範囲)。また、後半の 4 週間では主観的体調が顕著に改善していたとともに、前半に比べてより多くのトレーニングをこなせていた。タイムトライアルなどの客観的なパフォーマンス指標やレースパフォーマンスは定量できていないという限界はあるものの、この事例は、HRVB 法がアスリートの副交感神経の活性化を高める可能性を示している。なお、HRVB 法のメカニズムや実施方法の詳細は、Lehrer and Gevirtz (2014) や榊原 (2019) を参照されたい。

16名の男子大学生ホッケー選手と47名の女子大学生ボート選手を対象として17週間にわたりHRVを測定したHolmes et al. (2020b)によると、測定実施率は、チーム間で大きな差があった(ホッケー選

手:75 ± 12%, ボート選手:45 ± 29 %, 平均値 ± 標準偏差). この原因について著者らは、ホッケーチームのヘッドコーチは定期的に測定するように選手に対して声掛けをしていた一方で、ボートチームのヘッドコーチはほとんど声掛けをしていなかったという背景を踏まえ、動機づけの程度が影響していたと考察している. さらに、長期的に測定実施率を保つ上では、アスリートの動機づけを高めるためにコミュニケーションをとりながら、測定の重要性を適切に説明する必要があると述べている. 前述したとおり、アスリートがHRVを有効活用するためには、週当たり最低でも3回以上の測定が必要となる. したがって、ストレングス&コンディショニングコーチなどの専門家は、Ln RMSSDをモニタリングした上で、パフォーマンスとの関係や何がLn RMSSDに影響を与えているのかについて個々にフィードバックすることが大切である. また、指導者や専門家が身近にいないアスリートがHRVを活用する場合、自分自身でトレーニング負荷やトレーニング以外の要因がLn RMSSDに与える影響を注視することが求められる. HRVの測定実施率を高い水準で保ち、アスリートがより望ましいコンディショニングを実現するための参考資料として、本稿が一助となれば幸いである. 最後に、アスリートを対象としたHRVに関する先行研究のうち、トレーニング以外の要因との関係を詳細に検証した報告は見当たらない. したがって、本稿の読者がHRVに関するコンディショニングを実践した際には、その成果をスポーツパフォーマンス研究などの実践研究に関する学術誌へ投稿していただくことを望む.

引用文献

- ・ Al Haddad H, Laursen PB, Chollet D, Ahmaidi S, Buchheit M. (2011) Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *Int J Sports Med.* 32: 598-605.
- ・ Ayuso-Moreno RM, Fuentes-García JP, Collado-Mateo D, Villafaina S. (2020) Heart rate variability and pre-competitive anxiety according to the demanding level of the match in female soccer athletes. *Physiol Behav.* 222: 112926.
- ・ Bartholomew JB, Stults-Kolehmainen MA, Elrod CC, Todd JS. (2008) Strength gains after resistance training: the effect of stressful, negative life events. *J Strength Cond Res.* 22: 1215-1221.
- ・ Bellenger CR, Karavirta L, Thomson RL, Robertson EY, Davison K, Buckley JD. (2016) Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *Int J Sports Physiol Perform.* 11: 685-692.
- ・ Berntson GG, Bigger JT Jr, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul JP, Stone PH, van der Molen MW. (1997) Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology.* 34: 623-648.
- ・ Buchheit M. (2014) Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome?. *Front Physiol.* 5: 73.
- ・ Buchheit M, Chivot A, Parouty J, Mercier D, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S. (2010) Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *Eur J Appl Physiol.* 108: 1153-1167.
- ・ Cervantes Blásquez JC, Rodas Font G, Capdevila Ortis L. (2009) Heart-rate variability

- and precompetitive anxiety in swimmers. *Psicothema*. 21: 531-536.
- Costa JA, Brito J, Nakamura FY, Oliveira EM, Rebelo AN. (2018) Effects of late-night training on "slow-Wave sleep episode" and hour-by-hour-derived nocturnal cardiac autonomic activity in female soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*. 13: 638-644.
 - Da Silva DF, Verri SM, Nakamura FY, Machado FA. (2014) Longitudinal changes in cardiac autonomic function and aerobic fitness indices in endurance runners: a case study with a high-level team. *Eur J Sport Sci*. 14: 443-451.
 - de Freitas VH, Pereira LA, de Souza EA, Leicht AS, Bertollo M, Nakamura FY. (2015) Sensitivity of the Yo-Yo intermittent recovery test and cardiac autonomic responses to training in futsal players. *Int J Sports Physiol Perform*. 10: 553-558.
 - Doma K, Deakin GB, Bentley DJ. (2017) Implications of impaired endurance performance following single bouts of resistance training: an alternate concurrent training perspective. *Sports Med*. 47: 2187-2200.
 - Edmonds R, Leicht A, McKean M, Burkett B. (2015) Daily heart rate variability of Paralympic gold medallist swimmers: a 17-week investigation. *J Sport Health*. 4: 371-376.
 - Esco MR, Flatt AA, Nakamura FY. (2016) Initial weekly HRV response is related to the prospective change in VO₂max in female soccer players. *Int J Sports Med*. 37: 436-441.
 - Flatt AA, Allen J, Bragg A, Keith C, Earley R, Esco MR. (2020) Heart rate variability in college football players throughout preseason camp in the heat. *Int J Sports Med*. 41: 589-595.
 - Flatt AA, Esco MR. (2014) Endurance performance relates to resting heart rate and its variability: a case study of a collegiate male cross-country athlete. *J Aust Strength Cond*. 22: 39-45.
 - Flatt AA, Esco MR. (2016a) Evaluating individual training adaptation with smartphone-derived heart rate variability in a collegiate female soccer team. *J Strength Cond Res*. 30: 378-385.
 - Flatt AA, Esco MR. (2016b) Heart rate variability stabilization in athletes: towards more convenient data acquisition. *Clin Physiol Funct Imaging*. 36: 331-336.
 - Flatt AA, Esco MR. (2013) Validity of the athlete™ smart phone application for determining ultra-short-term heart rate variability. *J Hum Kinet*. 39: 85-92.
 - Flatt AA, Esco MR, Nakamura FY. (2018) Association between subjective indicators of recovery status and heart rate variability among Division-1 sprint-swimmers. *Sports (Basel)*. 26: 93.
 - Flatt AA, Esco MR, Nakamura FY, Plews DJ. (2017a). Interpreting daily heart rate

- variability changes in collegiate female soccer players. *J Sports Med Phys Fitness*. 57: 907-915.
- Flatt AA, Globensky L, Bass E, Sapp BL, Riemann BL. (2019a) Heart rate variability, neuromuscular and perceptual recovery following resistance training. *Sports (Basel)*. 7: 225.
 - Flatt AA, Hornikel B, Esco MR. (2017b) Heart rate variability and psychometric responses to overload and tapering in collegiate sprint-swimmers. *J Sci Med Sport*. 20: 606-610.
 - Flatt AA, Howells D. (2019) Effects of varying training load on heart rate variability and running performance among an Olympic rugby sevens team. *J Sci Med Sport*. 22: 222-226.
 - Flatt AA, Howells D, Williams S. (2019b) Effects of consecutive domestic and international tournaments on heart rate variability in an elite rugby sevens team. *J Sci Med Sport*. 22: 616-621.
 - Ge F, Yuan M, Li Y, Zhang W. (2020) Posttraumatic stress disorder and alterations in resting heart rate variability: a systematic review and meta-analysis. *Psychiatry Investig*. 17: 9-20.
 - Hanton S, Fletcher D, Coughlan G. (2005) Stress in elite sport performers: a comparative study of competitive and organizational stressors. *J Sports Sci*. 23: 1129-1141.
 - Hedelin R, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsén K. (2000) Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete. *Med Sci Sports Exerc*. 32: 1531-1533.
 - Holmes CJ, Fedewa MV, Dobbs WC, Liu Y, Flatt AA, Nakamura FY, Esco MR. (2020a) The effects of different body positions on the accuracy of ultra-short-term heart rate variability indexes. *J High Technol Manag Res*. 31: 100375.
 - Holmes CJ, Sherman SR, Hornikel B, Cicone ZS, Wind SA, Esco MR. (2020b) Compliance of self-measured HRV using smartphone applications in collegiate athletes. *J High Tech Manag Res*. 31: 100376.
 - Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*. 41: 3-12.
 - Hynynen E, Vesterinen V, Rusko H, Nummela A. (2010) Effects of moderate and heavy endurance exercise on nocturnal HRV. *Int J Sports Med*. 31: 428-432.
 - Iellamo F, Legramante JM, Pigozzi F, Spataro A, Norbiato G, Lucini D, Pagani M. (2002) Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*. 105: 2719-2724.
 - Javaloyes A, Sarabia JM, Lamberts RP, Moya-Ramon M. (2019) Training prescription guided by heart rate variability in cycling. *Int J Sports Physiol Perform*. 14: 23-32.

- Javaloyes A, Sarabia JM, Lamberts RP, Plews D, Moya-Ramon M. (2020) Training prescription guided by heart rate variability vs. block periodization in well-trained cyclists. *J Strength Cond Res.* 34: 1511-1518.
- Jiménez Morgan S, Molina Mora JA. (2017) Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 42: 235-245.
- Kamandulis S, Juodsnukis A, Stanislovaitiene J, Zuoziene IJ, Bogdelis A, Mickevicius M, Eimantas N, Snieckus A, Olstad BH, Venckunas T. (2020) Daily resting heart rate variability in adolescent swimmers during 11 weeks of training. *Int J Environ Res Public Health.* 17: 2097.
- Kiviniemi AM, Hautala AJ, Kinnunen H, Nissilä J, Virtanen P, Karjalainen J, Tulppo MP. (2010) Daily exercise prescription on the basis of HR variability among men and women. *Med Sci Sports Exerc.* 42: 1355-1363.
- Kiviniemi AM, Hautala AJ, Kinnunen H, Tulppo MP. (2007) Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *Eur J Appl Physiol.* 101: 743-751.
- Krejčí J, Botek M, McKune AJ. (2018) Stabilization period before capturing an ultra-short vagal index can be shortened to 60 s in endurance athletes and to 90 s in university students. *PLoS One.* 13: e0205115.
- Lehrer PM, Gevirtz R. (2014) Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? *Front Psychol.* 5: 756.
- Lehrer P, Kaur K, Sharma A, Shah K, Huseby R, Bhavsar J, Zhang Y. (2020) Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: a systematic review and meta analysis. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 45: 109-129.
- Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Vidal PP, Hausswirth C. (2013) Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 45: 2061-2071.
- Mitsuka T, Takayama F, Nabekura Y. (2019) Fine-tuning training strategy based on heart rate variability: a case study of a middle-distance runner. *Sports Perf Sci Reports.* 62.
- Mitsuka T, Takayama F, Nabekura Y. (2020) The longitudinal relationship among heart rate variability, training load, psychological state, and race performance in an elite middle-distance runner. *Sports Perf Sci Reports.* 88.
- Moalla W, Fessi MS, Farhat F, Nourira S, Wong DP, Dupont G. (2016) Relationship between daily training load and psychometric status of professional soccer players. *Res Sports Med.* 24: 387-394.
- Morales J, Yáñez A, Fernández-González L, Montesinos-Magraner L, Marco-Ahulló A,

- Solana-Tramunt M, Calvete E. (2019) Stress and autonomic response to sleep deprivation in medical residents: a comparative cross-sectional study. *PLoS One*. 14: e0214858.
- Mueller, K, Williams PS, Haley L, Heick J. (2020) Heart rate variability biofeedback improves sports performance in an elite female athlete. *Cardiopulm Phys Ther J*. 31: 123-132.
 - 永原 隆 (2019) 近年の実践研究で国際的に用いられる分析方法の例. *スポーツパフォーマンス研究*. editorial: 17-27.
 - Nakamura FY, Pereira LA, Cal Abad CC, Cruz IF, Flatt AA, Esco MR, Loturco I. (2017) Adequacy of the ultra-short-term HRV to assess adaptive processes in youth female basketball players. *J Hum Kinet*. 56: 73-80.
 - 夏目 誠 (2008) 出来事のストレス評価. *精神経誌*. 110: 182-188.
 - Noon MR, James RS, Clarke ND, Taylor RJ, Thake CD. (2018) Next day subjective and objective recovery indices following acute low and high training loads in academy rugby union players. *Sports (Basel)*. 6: 56.
 - Nuuttila OP, Nikander A, Polomoshnov D, Laukkanen JA, Häkkinen K. (2017) Effects of HRV-guided vs. predetermined block training on performance, HRV and serum hormones. *Int J Sports Med*. 38: 909-920.
 - Otter RT, Brink MS, Diercks RL, Lemmink KA. (2016) A negative life event impairs psychosocial stress, recovery and running economy of runners. *Int J Sports Med*. 37: 224-229.
 - Ornelas F, Nakamura FY, Dos-Santos JW, Batista DR, Meneghel V, Nogueira WJ., Brigatto FA., Germano MD., Sindorf MAG., Morena MA, Lopes CR, Braz TV. (2017) Daily monitoring of the internal training load by the heart rate variability: a case study. *J Exerc Physiol Online*. 20: 151-163.
 - Pecchia L, Castaldo R, Montesinos L, Melillo P. (2018) Are ultra-short heart rate variability features good surrogates of short-term ones? state-of-the-art review and recommendations. *Healthc Technol Lett*. 5: 94-100.
 - Perrotta AS, Jeklin AT, Hives BA, Meanwell LE, Warburton DER. (2017) Validity of the Elite HRV smartphone application for examining heart rate variability in a field-based setting. *J Strength Cond Res*. 31: 2296-2302.
 - Plews DJ, Laursen PB, Buchheit M. (2017a) Day-to-day heart-rate variability recordings in world-champion rowers: appreciating unique athlete characteristics. *Int J Sports Physiol Perform*. 12: 697-703.
 - Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. (2013a) Evaluating training adaptation with heart-rate measures: a methodological comparison. *Int J Sports Physiol Perform*. 8: 688-691.

- Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. (2014a) Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *Int J Sports Physiol Perform.* 9: 1026-1032.
- Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. (2012) Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? a case comparison. *Eur J Appl Physiol.* 112: 3729-3741.
- Plews DJ, Laursen PB, Le Meur Y, Hausswirth C, Kilding AE, Buchheit M. (2014b) Monitoring training with heart rate-variability: how much compliance is needed for valid assessment?. *Int J Sports Physiol Perform.* 9: 783-790.
- Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M. (2013b) Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Med.* 43: 773-781.
- Plews DJ, Scott B, Altini M, Wood M, Kilding AE, Laursen PB. (2017b) Comparison of heart-rate-variability recording with smartphone photoplethysmography, Polar H7 chest strap, and electrocardiography. *Int J Sports Physiol Perform.* 12: 1324-1328.
- Rabbani A, Flatt AA, Kargarfard M. (2019) Monitoring ultra-short heart rate variability and heart rate-running speed index in an elite soccer player: a case study. *Sports Perf Sci Reports.* 47.
- Saboul D, Pialoux V, Hautier C. (2013) The impact of breathing on HRV measurements: implications for the longitudinal follow-up of athletes. *Eur J Sport Sci.* 13: 534-542.
- 榑原雅人 (2019) 臨床に活かす心拍変動バイオフィードバック. *バイオフィードバック研究.* 46: 107-111.
- Sanz-Quinto S, Brizuela G, López-Grueso R, Flatt AA, Aracil-Marco A, Reina R, Moya-Ramón M. (2018) Monitoring heart rate variability before and after a marathon in an elite wheelchair athlete: a case study. *J Sports Sci Med.* 17: 557-562.
- Sanz-Quinto S, López-Grueso R, Brizuela G, Flatt AA, Moya-Ramón M. (2019) Influence of training models at 3,900-m altitude on the physiological response and performance of a professional wheelchair athlete: a case study. *J Strength Cond Res.* 33: 1714-1722.
- Schmitt L, Regnard J, Millet GP. (2015) Monitoring fatigue status with HRV measures in elite athletes: an avenue beyond rmssd?. *Front Physiol.* 6: 343.
- Schmitt L, Willis SJ, Fardel A, Coulmy N, Millet GP. (2018) Live high-train low guided by daily heart rate variability in elite Nordic-skiers. *Eur J Appl Physiol.* 118: 419-428.
- Sekiguchi Y, Adams WM, Benjamin CL, Curtis RM, Giersch GEW, Casa DJ. (2019) Relationships between resting heart rate, heart rate variability and sleep characteristics among female collegiate cross-country athletes. *J Sleep Res.* 28:

e12836.

- Stanley J, D'Auria S, Buchheit M. (2015) Cardiac parasympathetic activity and race performance: an elite triathlete case study. *Int J Sports Physiol Perform.* 10: 528-534.
- Stanley J, Peake JM, Buchheit M. (2013) Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Med.* 43: 1259-1277.
- Stults-Kolehmainen MA, Bartholomew JB, Sinha R. (2014) Chronic psychological stress impairs recovery of muscular function and somatic sensations over a 96-hour period. *J Strength Cond Res.* 28: 2007-2017.
- Task Force of the European Society of Cardiology, North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996) Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 93: 1043-1065.
- Thomas C, Jones H, Whitworth-Turner C, Louis J. (2020) High-intensity exercise in the evening does not disrupt sleep in endurance runners. *Eur J Appl Physiol.* 120: 359-368.
- Uusitalo AL, Uusitalo AJ, Rusko HK. (2000) Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *Int J Sports Med.* 21: 45-53.
- Vesterinen V, Nummela A, Heikura I, Laine T, Hynynen E, Botella J, Häkkinen K. (2016) Individual endurance training prescription with heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc.* 48: 1347-1354.
- Williams S, West S, Howells D, Kemp SPT, Flatt AA, Stokes K. (2018) Modelling the HRV response to training loads in elite rugby sevens Players. *J Sports Sci Med.* 17: 402-408.