

心拍変動モニタリングによる一流スポーツ競技者の 疲労評価に関する研究

日本スポーツ振興センター 飯塚 太郎
(共同研究者) 国立スポーツ科学センター 大岩 奈青
日本バドミントン協会 舩田 圭太

Evaluating Physical Fatigue in Elite Athletes by Monitoring Heart Rate Variability

by

Taro Iizuka

Japan Sport Council Multi Support Project

Nao Ohiwa

Japan Institute of Sports Sciences

Keita Masuda

Nippon Badminton Association

ABSTRACT

Since it has been considered that prolonged fatigue has negative influence on sports performance, it would be essential for athletes to continuously monitor day-by-day stress of training. In this study, we examined the relationships between training load and heart rate variability (HRV) indices, salivary cortisol concentration, salivary immunoglobulin A (SIgA) secretion rate, and subjective feeling of fatigue in elite athletes. Eleven Japanese national badminton team players (22.5 ± 3.0 yrs) participated in the study. Data were collected during an 8-day badminton national team training camp. As it was immediately followed by a major international competition, the focus of the training camp was to make the players in good form for the competition.

Every morning, beat-to-beat heart rate (HR) was recorded. Spectral analysis was used to calculate spectral power in the high-frequency (HF: 0.15-0.40Hz) band which represents parasympathetic autonomic activity. Saliva samples were collected to measure salivary cortisol concentration and SIgA secretion rate. The subjects were also asked to estimate subjectively perceived fatigue on a visual analogue scale. Training load was quantified by Training Impulse (TRIMPs). As training intensity and duration both decreased in the course of the training camp, TRIMPs in the second half (Day5-8) significantly decreased from that in the first half (Day1-4). In response to the decrease in TRIMPs, mean HR and salivary cortisol concentration significantly decreased in the second half. In contrast, HF significantly increased from the first to the second half. During the training camp, only daily values in HF had significant correlation with daily values in TRIMPs. These results suggest that measuring HRV indices such as HF would be an efficient tool for elite athletes to monitor day-by-day stress of training.

要 旨

バドミントン日本代表選手を対象に、強化合宿中のトレーニング負荷の推移を定量的に評価し、心拍変動から算出される自律神経活動指標、内分泌指標、免疫指標及び主観的コンディショニング指標の推移との関係性について検証した。直後に行われる国際大会へのコンディショニングを目的とした8日間の合宿の中で、トレーニング負荷は前半 (Day1 - 4) と比べて後半 (Day5 - 8) に有意に低下した。それと対応して、起床時心拍数は合宿後半に有意に低下し、心拍変動から算出される副交感神経活動指標 HF は有意に増加した。また、唾液コルチゾール濃度についても、合宿後半で有意な低下がみられた。一方で、合宿を通じた一日ごとのデータ間の関係性でみたとき、トレーニング負荷と有意な相関を示したのは翌朝起床時の HF のみであった。これらの結果から、一流スポーツ競技者において、トレーニングによってもたらされる身体的な疲労を評価するうえで心拍変動モニタリングが有用であることが示唆された。

緒 言

一流スポーツ競技者やその指導者の間では、蓄積された経験や知識に基づいて日々のトレーニングを通じた「コンディショニング」が行われ、ある程度のパターンが確立していることが多い。しかし一方で、それによってもたらされる「コンディショニング」の良し悪しの評価は、結果としての競技成績から判断されるか、あるいは競技者及び指導者の主観に委ねられることが依然として多いようである。そのため、トレーニング強度や量の調整などのコンディショニングが実際のコンディショニングに及ぼす影響に関して、客観的なデータからひとつひとつ検証される事例は限られたものとなっている。そして、その背景としては、競技者やコーチが簡便に使うことができ、その時々コンディショニングを客観的かつ有効に判断しうる指標が確立されていないことが挙げられる。

こうした中、これまで我々は、スピードスケートやウエイトリフティング競技のトップ競技者を対象として試合やトレーニング合宿での測定を行い、一流競技者のコンディショニング、特に身体的疲

労の評価に応用可能な指標に関する検討を行ってきた。その中で、毎朝起床時の心拍変動から算出される自律神経活動指標について、競技者の疲労に関する客観的な評価指標として有用である可能性が示されてきた^{1,2,3)}。特に、心拍変動高周波成分 HF に関しては、副交感神経活動からの入力に依存して変調することが明らかにされており⁴⁾、変化の要因が限られ明確であることから、一流スポーツ競技者の疲労の推移を評価しうる指標となることが期待される。しかしこれまで、一流スポーツ競技者を対象に、疲労の大きな要因となる日々のトレーニング負荷を定量的に評価したうえで、心拍変動の推移との関係性を検証した研究はみられない。

そこで本研究では、一流スポーツ競技者のトレーニング負荷を定量化し、疲労評価に対する心拍変動モニタリングの有用性について、トレーニング負荷の推移との関係性から検証することを目的とした。また、内分泌や免疫系と関連する他のコンディション指標とのデータの比較・検討も併せて行うこととした。

1. 方法

1.1 対象

バドミントン日本代表チーム男子選手6名、女子選手5名の計11名(22.5±3.0歳)を対象として研究を行った。すべての対象者に研究の目的や潜在的な危険性を説明したうえで、文書による研究参加への同意を得た。本研究は、国立スポーツ科学センター倫理委員会の承諾を得て実施した。

1.2 測定

測定は、2013年9月10日から17日にかけての8日間、味の素ナショナルトレーニングセンターを拠点に行われたバドミントン日本代表チーム強化合宿で実施した。対象となった合宿は、9月18日から行われる主要国際大会「ジャパンオープン」(東京)に向けた直前のコンディショニングを目的として組まれたものであった。

測定項目として、まず、合宿中の身体的な疲労状態に大きな影響を及ぼす毎日のトレーニング負荷を定量的に評価するため、指標として Training Impulse (TRIMPs) を用いることとした⁵⁾。TRIMPs は、トレーニング中の心拍数から推定される「強度」及びトレーニング「時間」のかけ合わせにより、トレーニング負荷を一つの数値として表す指標である。それに向けて、対象者にはトレーニングの際、胸部に心拍計(RS800CX, Polar 社)を装着してもらい、トレーニング中の心拍数(HR)及びトレーニング時間(duration)を記録した。

一方で、コンディション評価のための測定は対象者の起床時(午前6-8時)に行い、1回あたり10-15分程度で完了できるよう、次の手順でまとめて実施した(図1)。はじめに、唾液採取に向けて計3回、1回あたり30mlの蒸留水で口腔内を十分にゆすいでもらった。続いて、100mmの Visual Analogue Scale (VAS) を用い、主観的に疲労や緊張が全くない状態を0mm、最大の状態を100mmとして、疲労及び緊張に関する主観的コンディションの評価を行った。さらに、心

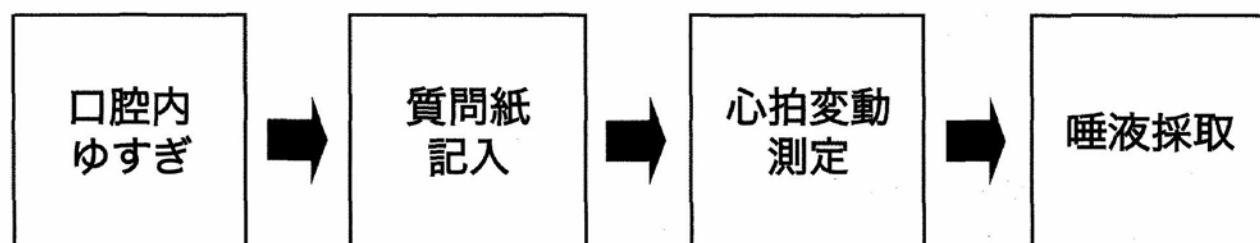


図1 起床時コンディション測定の流れ

拍計 (RS800CX, Polar 社) を装着し, 座位安静で5分間, 心拍変動を測定した。測定の際, メトロノームのリズムに合わせ, 呼吸周期を一定の4秒に保つこととした。その後, 無味の滅菌綿 (Salimetrics Oral Swab, SALIMETRICS 社) を60秒間に60回咀嚼してもらい, 分泌された唾液を滅菌綿 (10mm×30mm) に吸収させて採取した。唾液の回収は, 3000rpmで15分間遠心し, 滅菌綿から分離させることにより行った。

1.3 解析

TRIMPsの計算は, 運動中の平均心拍数 (HR_{ex}), 安静時心拍数 (HR_{rest}) 及び最大心拍数 (HR_{max}) を用いて, 下記の式により行った (ここで, $e=2.712$, $x=[(HR_{ex}-HR_{rest})/(HR_{max}-HR_{rest})]$ とする)。

$$TRIMPs(\text{男性}) = \text{duration}[(HR_{ex}-HR_{rest})/(HR_{max}-HR_{rest})]0.64e^{1.92x}$$

$$TRIMPs(\text{女性}) = \text{duration}[(HR_{ex}-HR_{rest})/(HR_{max}-HR_{rest})]0.86e^{1.67x}$$

心拍変動データから求められる自律神経活動指標に関しては, まず測定5分間の平均心拍数を求めた。さらに, MemCalc / Win (GMS 社) を用いて各データに対して周波数解析を行い, 低周波帯域 (LF: 0.04-0.15Hz) 及び高周波帯域 (HF: 0.15-0.40Hz) のパワースペクトルをそれぞれ算出した。LFは交感神経活動と副交感神経活動の双方を反映すること, HFはもっぱら副交感神経活動のはたらきを反映することが明らかにされている⁴⁾。さらに, 自律神経活動における交感神経・副交感神経活動のバランスを推定する目的から, LF/HF 及び HFnu (=HF/(LF+HF)×100, nu: 標準化単位 normalized unit) の大きさも算出した。

唾液サンプルに関しては, トレーニングによる身体的ストレスを評価するための内分泌指標とし

てコルチゾール濃度の測定を行った。コルチゾール濃度は, EIA キット (Salivary Cortisol enzyme immunoassay kit, Salimetrics 社) を用いて測定した。さらに, 免疫機能の状態を評価するための指標として, 分泌型免疫グロブリン A (SIgA) の分泌速度を求めた。SIgA 分泌速度は, SIgA 濃度と唾液分泌速度の積から算出した。SIgA 濃度は enzyme immunoassay (EIA) キット (Salivary secretory IgA indirect enzyme immunoassay kit, Salimetrics 社) を用いて測定し, 唾液分泌速度については, 唾液の比重を1として換算した1分間の唾液採取量を1分間の唾液分泌量と考えて求めた。

1.4 統計

全ての統計量は平均値と標準偏差で示した。TRIMPs 及び各コンディション指標に関する合宿前半と後半の比較には, 対応のある t 検定を用いた。また合宿期間全体を通じた TRIMPs と各コンディション指標との関係性の分析にはピアソンの相関分析を用いた。統計処理は, 統計ソフト SPSS19.0 for Windows (IBM 社) を用いて行った。

2. 結果

2.1 各コンディション指標に関する合宿前半と後半の比較

トレーニング負荷を反映する TRIMPs の推移に関して, 合宿前半では高い値をとった一方で, トレーニング時間が半日のみと短かった Day4 を境に, Day5 以降の合宿後半では徐々に値が低下した (図2 (A))。Day1 から Day4 までを前半, Day5 から Day8 までを後半として TRIMPs の平均値を個人ごとにそれぞれ算出し比較を行ったところ, TRIMPs は前半と比べて後半で有意に低い値をとった ($P<0.01$, 図2 (B))。

そうした中で, 起床時の心拍変動データから求められる自律神経活動指標に関して, 平均心拍数

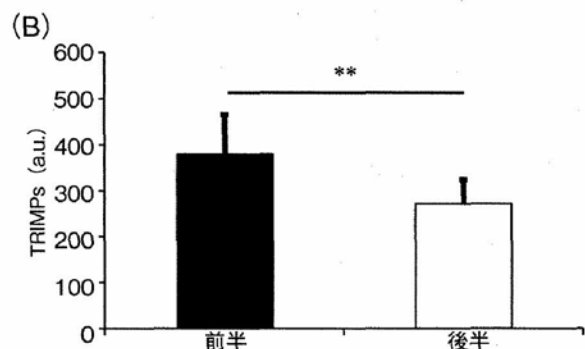
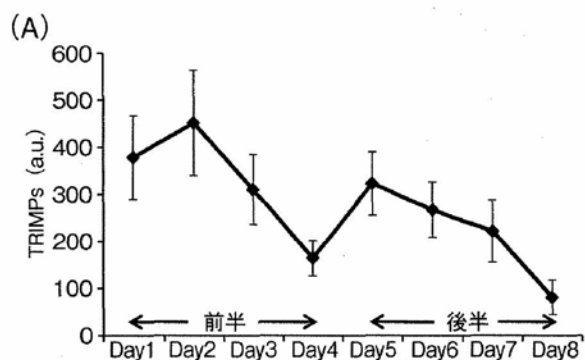


図2 (A) 合宿中のTRIMPs平均値の推移
(B) 合宿前半と後半におけるTRIMPsの比較
(** : $P < 0.01$)

が合宿前半と比べて後半で有意に低下した一方で、HFは有意に増加していたことが示された（ともに $P < 0.01$, 図3 (A)・(B)）。一方で、LF/HF及びHFnuの値については、合宿前半と後半とで有意差がみられなかった。唾液データでは、コルチゾール濃度が合宿前半と比べて後半で有意に低下していたが ($P < 0.05$, 図4 (A)), SIgA分泌速度に関しては両者で有意差がなかった(図4(B))。また、主観的疲労感及び緊張の値に関しても、ともに合宿前半と後半とで有意差はみられなかった。

2.2 TRIMPsと各コンディション指標との関係性

TRIMPsとそれ以外のコンディション指標との関係性について、合宿期間中全体を通じて一日ごとの値に対応がみられるか検証した。各データは、まず個人内でZスコアによる標準化を行った。そのうえで、一日ごとに全員のZスコアを揃えて平均値を算出し、Zスコアの平均値どうしの相

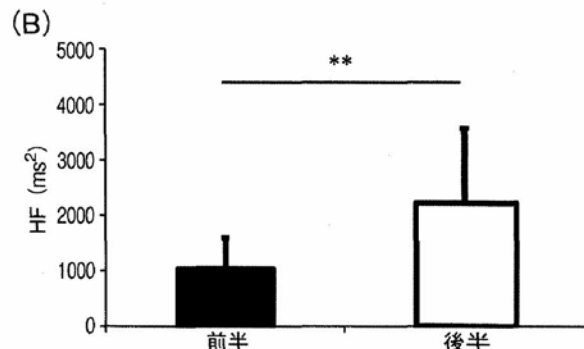
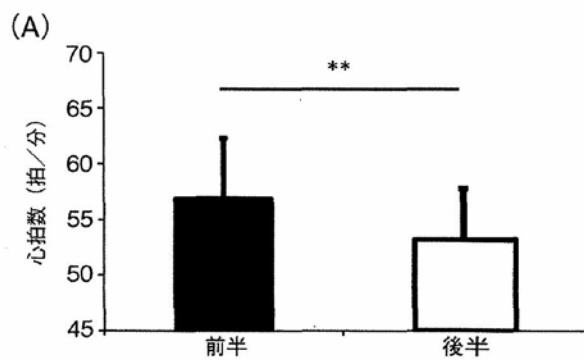


図3 合宿前半と後半における起床時の
(A) 心拍数 (B) HFの比較
(** : $P < 0.01$)

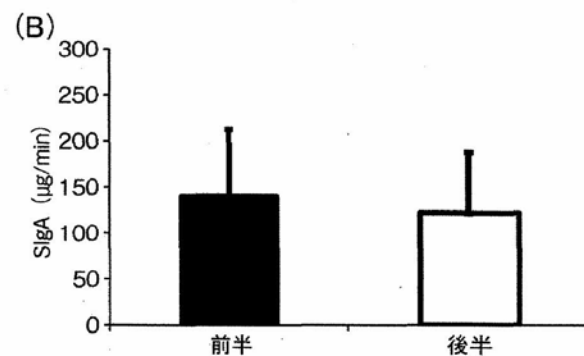
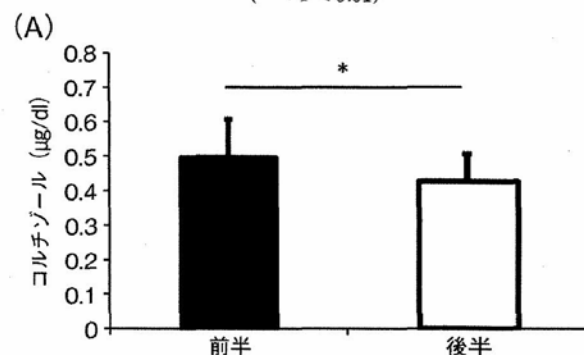


図4 合宿前半と後半における起床時の
(A) コルチゾール濃度 (B) SIgA分泌速度の比較
(* : $P < 0.05$)

関によって指標間の関係性を求めた。その結果、TRIMPsの値と翌朝起床時のHFの値との間に有意な負の相関があった ($r = -0.85$, $P < 0.05$, 図5)。一方で、TRIMPsとそれ以外の指標との間に有意

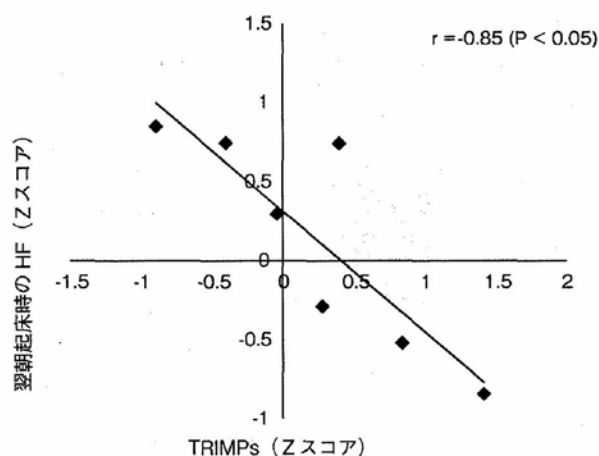


図5 TRIMPsと翌朝起床時のHFとの関係

な相関はみられなかった。

3. 考 察

本研究でデータ測定を行ったバドミントン日本代表合宿は、選手の強化はもちろん、合宿終了翌日から始まる国際大会に向けたコンディショニングも大きな目的としていた。そのため、8日間の合宿の前半 (Day1 - 4) では比較的強度の高いトレーニングメニューが組まれた一方で、後半 (Day5 - 8) ではゲーム練習や技術練習などの調整が中心となり、トレーニング時間も短くなった。これを反映するように、トレーニング負荷 (TRIMPs) の値は、合宿前半と比較して後半に有意に低下した。

そうした状況を反映して、自律神経活動指標では、合宿後半において起床時の平均心拍数が有意に低下した一方で、副交感神経活動の大きさを反映する HF の値は有意に増加していた。さらに、唾液コルチゾール濃度も、合宿後半において有意に低下していた。コルチゾール濃度については、血中の安静値がトレーニング誘発性のストレスを反映することが知られているが^{6,7)}、唾液から測定されるコルチゾール濃度は、この血中コルチゾール濃度と非常に高い相関を持つことが報告されている⁸⁾。そのため、合宿後半の唾液コルチゾール濃度の低下についても、トレーニング負荷の低

下に伴う身体的ストレスの減少を反映したものと捉えられる。

一方で、口腔内免疫機能を反映する SIgA 分泌速度には、合宿前半と後半とで差がみられなかった。高強度・長時間運動は SIgA 分泌速度を低下させ、上気道感染症の発症要因となることが明らかにされている^{2,3)}。しかし、今回、上気道感染症に罹患した対象者はなく、トレーニング負荷の高かった合宿前半を含めて SIgA 分泌速度の顕著な低下がみられなかったことから、トレーニング負荷がもたらす免疫系のコンディション低下については、合宿を通じて十分にコントロールされていたものと考えられる。

ところで、合宿後半において身体的なストレスが減少していたことが示唆されるにも関わらず、主観的には疲労感が持続し、合宿後半でも低下しなかったことは興味深い。このことから、トレーニングによってもたらされる身体的なストレスと主観的な疲労感の大きさは必ずしも一致しないことがうかがわれ、起床時における心拍数の低下や HF の増加、あるいは唾液コルチゾール濃度の低下は、疲労状態トータルの変化というよりは、あくまでトレーニングによる身体的なストレス状態の変化を反映したものとして限定的に捉える必要があるだろう。

それでも、スポーツ競技のコンディショニングはトレーニング負荷の調節を通じて行われることから、それによってもたらされる身体的ストレスの変化を客観的かつ的確に評価しうる指標を確立していくことは、さらに有効なコンディショニングの方策を探っていくうえでも重要であるといえる。そうした中で、本研究では、HF の値についてのみ、一日ごとのトレーニング負荷の値と有意な相関関係があることが示された。Pichot らは、トレーニングに対する疲労の評価で一般的に用いられる心拍数と、HF など心拍変動から求められる自律神経活動指標とを比較したとき、前者がさ

まざまな要因によって調節されるうえデータの変動が小さいのに対し、後者は変化の要因が明確であるうえデータの変動が大きいことから、状態の変化を捉えやすい指標であることを述べている⁹⁾。さらに、Furlan らは、30 分間で疲労困憊に至る強度の運動を行った 24 時間後において、被験者の心拍数はベースラインまで回復していたものの、HF の値が引き続き低下していたことから、交感神経活動優位の状態が続いていた可能性を指摘している¹⁰⁾。これらのことは、運動がもたらす身体的ストレス及びその回復について自律神経活動を通じてモニターしていくうえで、心拍変動に着目していくことの有用性を示唆するものといえる。

このように、心拍変動から求められる自律神経活動指標を継続的にモニターしていくことは、簡便かつ非侵襲的であることから、一流スポーツ競技者にとってコンディショニングの効果を検証するための実際的かつ有用な指標となる可能性がある。ただし、筋力トレーニングを中心として行う競技と持久的トレーニングを中心として行う競技とでは、トレーニングに対する心血管系の応答や回復過程が異なる可能性があることから¹¹⁾、競技特性を踏まえながら、さらに詳細な検討を行っていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、バドミントン日本代表選手を対象として、強化合宿期間中、身体的疲労の大きな要因となる一日ごとのトレーニング負荷を定量的に評価し、毎朝起床時に測定した自律神経活動指標を中心に、唾液コルチゾール濃度、SIgA 分泌速度、主観的疲労感といったコンディション指標との関係性について検証した。その結果、起床時心拍変動データの周波数解析から得られる自律神経活動指標をモニターすることが、トレーニングによってもたらされる一流競技者の身体的疲労を評価す

ることに有用である可能性が示された。

謝 辞

本研究に対し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厚く御礼申し上げます。さらに、研究遂行にあたり多大なご助力をいただいたバドミントン日本代表チームの朴柱奉ヘッドコーチ、日本スポーツ振興センター・マルチサポート事業の烏賀陽真未子氏、平野加奈子氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 飯塚太郎, コンディショニングの評価とその活用「心拍数・心拍変動」, 臨床スポーツ医学, 28, 166-171 (2011)
- 2) Kon M., Iizuka T., Maegawa T., Hashimoto E., Yuda J., Aoyanagi T., and Takahashi H., Salivary secretory immunoglobulin A response of elite speed skaters during a competition period. *J. Strength Cond. Res.*, 24(8), 2249-2254 (2009)
- 3) 今有礼, 飯塚太郎, 鈴木なつ未, 前川剛輝, 谷所慶, 湯田淳, 青柳徹, 木村文律, 高橋英幸, テーパリングがトップスピードスケート選手の唾液中 SIgA に及ぼす影響. *トレーニング科学*, 21(4), 369-375 (2009)
- 4) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur. Heart J.*, 17, 354-381 (1996)
- 5) Borresen J., and Lambert M.I., Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 101, 503-511 (2007)
- 6) Lehmann M., Gastmann U., Petersen K.G., Bachl N., Seidel A., Khalaf A.N., Fischer S., and Keul J., Training-overtraining: performance, and hormone levels, after a defined increase in training volume versus intensity in experienced middle- and long-distance runners. *Br. J. Sports Med.*, 26(4), 233-242 (1992)
- 7) Urhausen A., Gabriel H.H., and Kindermann W., Impaired pituitary hormonal response to exhaustive exercise in overtrained endurance athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30(3), 407-414 (1998)

- 8) 井澤修平, 鈴木克彦, 唾液中コルチゾールの測定キットの比較—唾液中・血漿中コルチゾールの相関ならびに測定法間の比較—. 日本補完代替医療学会誌, 4, 113-118(2007)
- 9) Pichot V., Roche F., Gaspoz J-M., Enjolras F., Antoniadis A., Minini P., Costes F., Busso T., Lacour J-R., and Barthelemy J.C., Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32(10), 1729-1736 (2000)
- 10) Furlan R., Piazza S., Dell' Orto S., Gentile E., Cerutti S., Pagani M., and Malliani A., Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovasc. Res.*, 27, 482-488(1993)
- 11) Otsuki T., Maeda S., Iemitsu M., Saito Y., Tanimura Y., Sugawara J., Ajisaka R., and Miyauchi T., Postexercise heart rate recovery accelerates in strength-trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39 (2), 365-370(2007)