

〈資料〉

[スポーツ医科学研究班]

心拍変動によるアスリートのコンディション評価 の可能性について

加 納 樹 里

は じ め に

“Hart trainiert und doch verloren?” (ハードにトレーニングしても、負ける)、スポーツ科学を勉強し始めて間もない筆者に、深い印象を与えたスポーツ生理学入門書のタイトルである⁸⁾。このような場合、通常スポーツ科学からのアプローチとしては、選手の技量がそもそもいかなるレベルにあったのかをパフォーマンステストや体力測定で判断し、さらにトレーニング方法が妥当であったのか、といった点から敗因究明をしようとする。一方で、一流の資質を有した選手が適切なトレーニングを行って臨んでも、ピークパフォーマンスを発揮できずに敗退することは、我々のしばしば見聞することである。

俗にいうコンディショニングの失敗は様々な要因によって生じうるが、その一因として、“オーバートレーニング”という現象が指摘をされる。オーバートレーニングの概念そのものは古くから知られているが、その状況を単に生理的な側面からのみ分析しようとしても、未だに何らかの“ジェネラル・スタンダード”が存在するわけではない。生体のコンディションは、生理的な状況と心理的な状況が複雑にからみ合って把握されるべきものなので、これを一律の尺度で捉えることに多くの困難がともなっていると考えられる。

近年、特に循環器の分野で臨床応用されるようになった心拍変動解析は、非侵襲的に心臓の自律神経緊張状態を把握しうる手段として注目される。さまざまなバイアスの関与は予想されるところだが、身体症状と精神症状が同時に指摘されるスポーツ選手のオーバートレーニングの把握に、この心拍変動の手法を用いることは興味深いと考えられる。

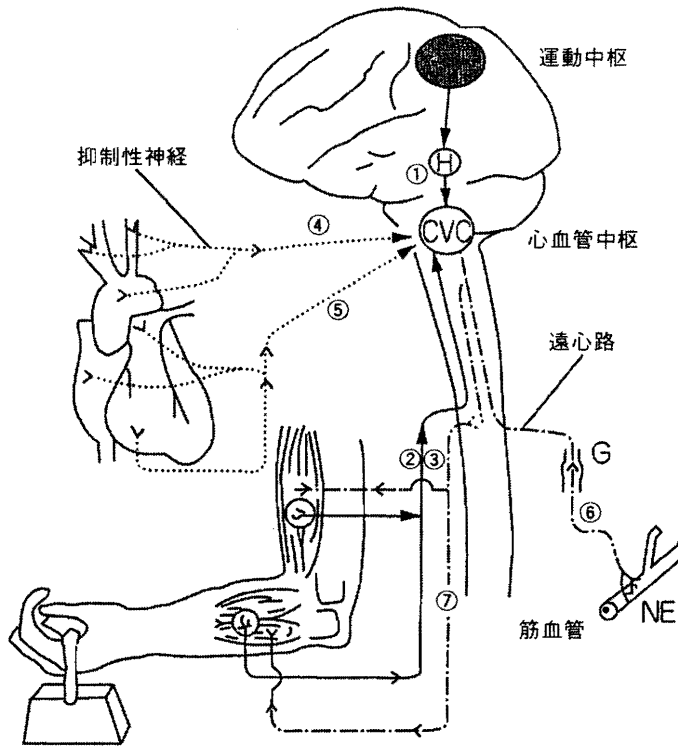
そこで、その適応を判断する一助として、関連する文献のショートレビューを試みた。

運動時の自律神経活動

オーバートレーニング時の自律神経活動について考察する前に、運動時の自律神経応答と、トレーニングの影響について概観する必要がある。

運動時の自律神経は、基本的には以下のような機序により調整される(図1)²⁴⁾²⁹⁾。

- 大脳皮質からの下行性指令 (central command) が、脳幹や一部脊髄に存在する心血管中枢に働き、迷走神経の緊張低下や交感神経の活動亢進を生じる。
- 活動筋の収縮と代謝産物の蓄積により、筋の機械的受容器と化学的受容器を介した求心性の



- ①：セントラルコマンド，②：筋機械受容器反射求心路，③：筋化学受容器反射求心路，
 ④：動脈圧反射求心路，⑤：心肺圧反射求心路，⑥：筋交感神経遠心路，
 ⑦： α 運動ニューロン，H：視床，G：交感神経節，NE：ノルエピネフリン。
 (斎藤等の文献：循環、運動時の酸素運搬システム調節NAP：東京1999より引用)

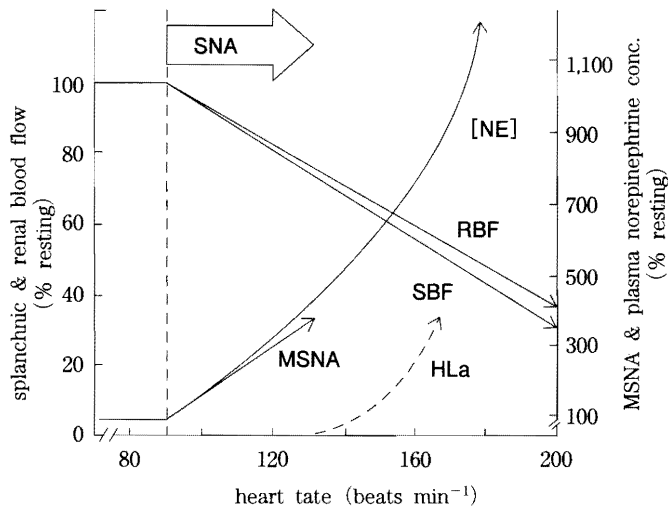
図1 運動時の循環調節にかかわる主な仕組み

刺激が、交感神経活性を亢進させる。

- 本来血圧変動を緩衝する役割をもつ動脈圧受容体反射 (baroreflex) は、運動時には高い血圧レベルにリセットされることにより、動脈圧と心拍数の上昇が同時に生じ、末梢血管調節や、血流再配分がもたらされる。

一方、運動時の心臓自律神経による心拍数調節機構については、薬理的な神経ブロック下での観察を通じた研究が主流であり、軽負荷運動時には主に副交感神経の抑制により、心拍数100拍/分以上の中程度以上の負荷では、主に交感神経活動の亢進により心拍数が増加するとされている。一方で日常的なトレーニングは、心臓自律神経にも影響を及ぼしており、安静時の徐脈と、一定運動強度下での心拍数の減少がよく知られた現象である。また、トレーニングを積んだアスリートにおいて、動脈圧受容体反射が減弱することも注目されているが、いずれも副交感神経機能の変化 (increase in vagal tone) がその主因と考えられ、継続的な運動トレーニングが自律神経に及ぼす長期的影響という視点で興味深い。

交感神経刺激により副腎髄質から分泌されるエピネフリンに代表されるように、自律神経は液性調節因子を介して、運動時エネルギー代謝にも影響を及ぼしており、短時間で観察される神経系の変化と運動の関係は、いまだに多くの研究の余地を残していると考えられる (図2)。



SNA: 交感神経活動 MSNA: 筋交感神経活動
 NE: ノルエピネフリン RBF: 腎血流量
 SBF: 内臓血流量 HLa: 乳酸

(Rowell 等の文献: J. Appl. Physiol. (69)407-418. 1990より引用)

図2 動的運動時の交感神経反応の概要

オーバートレーニングと自律神経活動

一般的には、“過剰なトレーニングによって蓄積された慢性疲労状態”と理解されているオーバートレーニングの状態（オーバートレーニング症候群：Overtraining Syndrome；以下OTSと記す）は、疲労と回復のバランスが崩れ、競技力の低下や、生理的パラメータの異常、精神的症状を伴った臨床的症状ということができよう（脚注1）。

1976年に発表されたイスラエルの総説の冒頭には、自律神経との関わりでオーバートレーニング発症の徴候と症状を二分した、著明な考え方が紹介されている⁶⁾。最近でも頻繁に引用され、一般に交感神経型 (basedowides-Sympathetic.)、副交感神経型 (addisonoides-Parasympathetic.)として知られるその区分によれば、OTSでは全く相反する徴候や症状が、体と心に生じているように受け取れる（脚注2）。彼等はオーバートレーニングをあくまで臨床の立場から分析し、その機序については不明な点が多いが、複合的に種々の要因が重複し、負荷と負荷耐性の間に生じた「アンバランスな状態」がOTSであるとしている。未然の予防策としては、トレーニングの強度を観察する手段などが考えられ、同化／異化バランスの指標として血中のテストステロン／コルチゾール比などの生理的パラメータが研究されている²⁶⁾。また、OTSが示す多様な症状の原因としては、視床下部＝脳下垂体系の機能異常が推察され⁵⁾、H. Kuipers & H. A. Keizer (1988)¹¹⁾ や、Rod W. Fry等 (1991)¹⁾ が、精力的にOTSの現象や兆候を総説している（表1）。しかし、トレーニングそのものだけでなく、家庭、経済状況、栄養状況等の環境要因が大きな誘因となりうることから、また、しばしばトレーニングの量以上に質的な問題が前面に出てくることから、OTSはその名称と言葉の響き (over + train) から判断される程、画一的な症状を示すものではないとの解釈が今日でも一般的であり、その全体像についての知見は、数十年を経ても飛躍的に深まったとはいえない²⁵⁾。

（脚注1）オーバートレーニングに関する用語には、若干の混乱がみられる。通常、Overtraining Syndrome or stalenessは、行動、感情、身体に慢性的な症状が顕著であるとされており、短期間に回復可能な状況であるOver-reaching（オーバーリーチング）や、Overstrain, Overloadとも厳密に区別されるべきものである⁹⁾¹¹⁾。

（脚注2）各々の名称の由来は、アンソン型：慢性副腎皮質機能不全症に類似し、体重減少や、基礎代謝異常は見られず、安静時心拍数は低下する。どちらかと言えば熟練した競技者に多く発症するとされる。バセドウ型：甲状腺機能亢進症に類似し、体重減少や、基礎代謝異常を伴い、安静時心拍数は増加する。瞬発系競技選手や、比較的若い、未熟練競技者に多いとされている。

表1 オーバートレーニング時の主な臨床所見

交感神経緊張型	副交感神経緊張型
安静時心拍数増加 競技力低下 食欲低下 体重減少 運動後の安静時心拍数への回復遅延 神経過敏症および情緒不安定性の増強 睡眠障害 トレーニングおよび競技意欲の喪失 安静時血圧上昇 起立性低血圧 運動後の安静時血圧への回復遅延 傷害頻度の増加 感染頻度の増加 運動中の最大血中乳酸値の低下 最大パワーの減少	体力低下 安静時心拍数減少 運動後の心拍数回復が早まる 運動中の低血糖 粘液質的行動 運動中の血中乳酸値の低下 運動中の最大血中乳酸値の低下

(文献11より引用)

高田等は²³⁾、トレーニングを積んだ対象者に、100km マラソンという急性の過大負荷後と、慢性のトレーニング負荷後の睡眠中のホルター心電図記録を検討し、急性負荷直後の平均心拍数が高値でありながら、心拍変動が大きくなるという結果を報告している。過酷な長時間運動による交感神経緊張の回復遅延と、反射性の迷走神経亢進状態が引き起こした結果と推察されているが、このような現象が直接オーバートレーニングに結びつくか否かは別として、正常下では鏡面的に変化する両神経が、アンバランスな状況に陥ることが問題である可能性を示唆しており、興味深い。

女性アスリートを対象とした希少な研究として、A. L. T. Uusitalo等は²⁷⁾、エンデュランストレーニングを積んだ女性アスリートを対象に、高強度トレーニング時とオーバートレーニング時の仰臥位と立位 (head-up tilt) の心拍変動と血圧変動を報告している。彼等によれば、高強度のトレーニングにより、仰臥位での心交感神経活動の増大 (低周波領域のパワーを示すR-R間隔変動 (RRI LFP) と、立位への体位変換直後に現れる、二相性の圧受容器反射が介在する反応 (biphasic heart rate response) の抑制がもたらされた。オーバートレーニングと思われる状況下では、立位での心拍変動が減少する傾向が認められたが、さらに立位を保った場合 (prolonged standing after head-up tilt) の心拍応答には、個人間でばらつきが認められたと報告している。

循環調節系の自律神経の異常は、CFS (= Chronic Fatigue Syndrome : 慢性疲労性症候群) 患者を対象とした能動的起立試験 (ここでは Schellong 試験) の結果としても報告されている。稲光等によれば⁴⁾、臥位時の心拍変動解析で LF/HF 比の上昇と HF の低下、立位での総パワー値の低下と MF 値の低下が示されている⁴⁾。但し、これらの現象が、CFS や OTS という機能不全 (病態) の結果なのか、原因なのかは明らかではない。

オーバートレーニングの状況で指摘される気分・感情の変化と、生理的パラメータの関連については、POMS や心理アンケートを用いた先行研究が存在する。久保田等は¹⁰⁾、防災訓練時のストレス状況下で、生理的指標としての心拍変動とアンケートに基づく心理的指標の変化を分析し、各感情因子と副交感神経機能を示す高周波領域 (HF) のエネルギーとの間に、負の相関傾向を報告している。また、佐藤等も¹⁹⁾²⁰⁾、冠動脈バイパス手術後の患者を対象に、POMS スコアの「緊張—不安」の改善に、運動直後の心拍数減衰応答 (T30) により評価した副交感神経の機能回復が寄与していることを示唆している。

菅原等は²²⁾、この時定数 (T30) をフィールドで簡略に評価する指標として、運動終了後 30 秒間の心拍数減少率 (% Δ HR30) を提案し、合宿中のアスリートの体調評価の指標として検討している。心臓副交感神経系の回復応答としての % Δ HR30 が、起床時心拍数以上に高い相関でトレーニング量を反映し、コンディションの変動を把握する有効な手段になりうるとしている。

アスリートの体調評価を念頭においた類似の報告としては、一流の持久的運動選手を対象に、OTS に至る以前のリカバリー可能な状態であるオーバーチングのパラメータとして、早朝起床時の仰臥位と立位での心拍数の差を用いた試みも報告されている²⁸⁾。

OTS は、神経系-免疫系-内分泌系の連関した多因子多形性の症候群であり、自律神経症状のみでその全容を探ることは到底できないが、現象として捉えた場合、循環系自律神経の調節に何らかの異常が生じていると推察する十分な根拠は存在する。非侵襲的な心拍変動を用いることにより、一般の運動愛好者をも含めたアスリートの生理的コンディションとメンタルコンディションを評価する試みは、十分に興味深いことと考えられる。

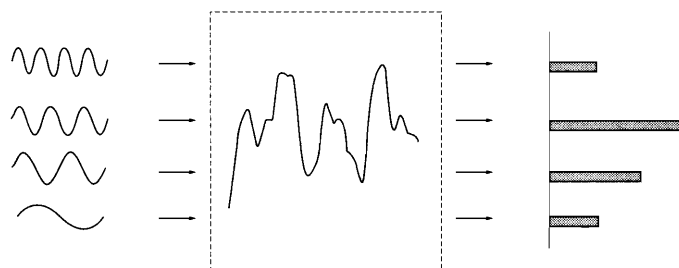
心拍変動解析を用いた自律神経評価法

一見規則正しく調律を刻んでいるように見える心臓の拍動は、洞結節の拍動周期を調整している自律神経活動の影響を受け、実は微妙に揺らいでいる。連続する RR 間隔のゆらぎを解析し、そこから逆に心臓自律神経の活動状態を探ろうとするのが心拍変動解析であり、1990年

代頃から特に循環器の臨床領域で広く研究されるようになった²⁾⁷⁾。心拍変動解析は、同時に自律神経活動に作用する呼吸、血圧、体位、体温などの生体情報を、間接的に評価しうる利点を有する。このような変動の一因として、迷走神経の影響により呼吸のリズムが関係することが知られているが(吸気時に間隔が減少し、呼気時に増大する)、こうした周期的な変動を定量するために、単位時間当たりのRR間隔時系列データを周波数解析する手法が、心拍変動のスペクトル解析の基本的な考え方である(図3)¹⁴⁾³⁰⁾。

通常循環機能は、対照的な作用を有する交感神経と副交感神経の相互作用により調節され(Sympathovagal balance)、正常安静時の心拍変動スペクトル解析では、二つの主成分；低周波成分と高周波成分が観察される。高周波成分は副交感神経をブロックすることにより完全に消失し、中周波・低周波成分は交感、副交感神経のブロックで抑制されることが報告されている¹⁵⁾。この事実から、定説ではないが、一般的には0.15~0.20Hzを境に、高周波成分(HF)と低周波成分(LF)に分け、高周波成分(HF)を副交換神経の指標に、またLF/HFの比を交換神経指標とみなす先行研究が多数存在する²⁾⁴⁾⁷⁾¹⁰⁾。自律神経活動は、一日中一定値を保つわけではなく、サーカディアンリズム(circadian rhythm)として知られる日内変動を示す他、覚醒中には、前項でも触れた様に身体的・精神的ストレス、呼吸、食事、体位等の外因性の影響を受けて変動する(図4)。

特に心拍変動とサーカディアンリズムの関係は、生理的、病理的にも注目されており、早朝にみられる急激な変化(交感神経活動の亢進と副交感神経の減退)と心臓突然死事故との因果

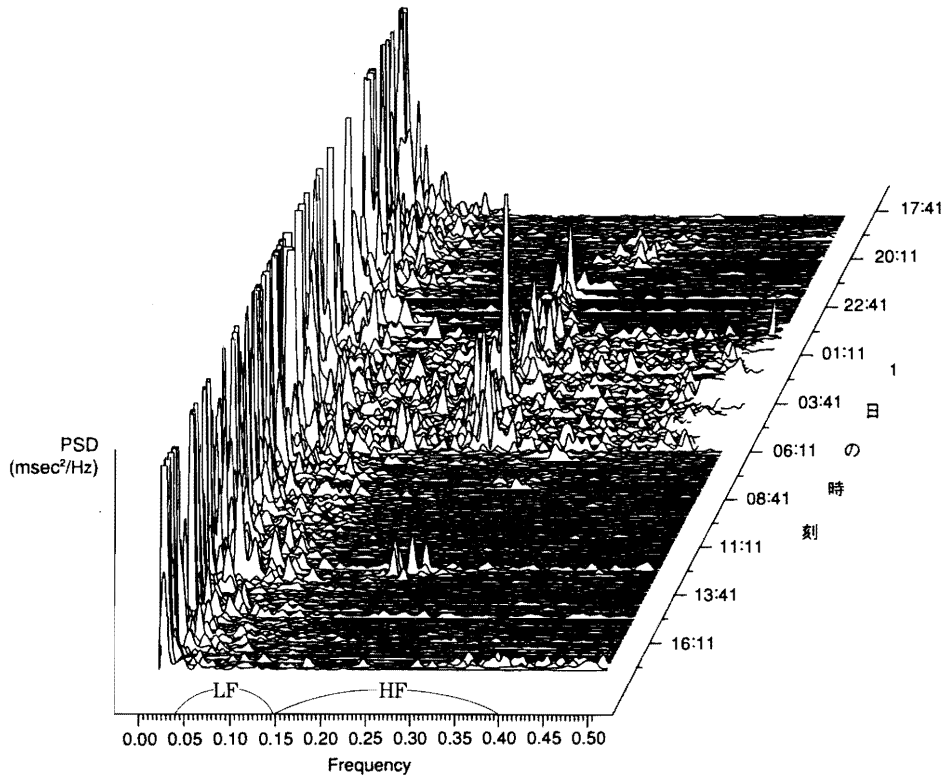


不規則な変動をしているように見える信号(中)のうち、ある一定周期の正弦波(左)に共振する成分の大きさ(左)を求めようとする。このような観点から、すべての周期の正弦波に対する共振成分を連続的に記述したものは、スペクトル密度関数とよばれる。

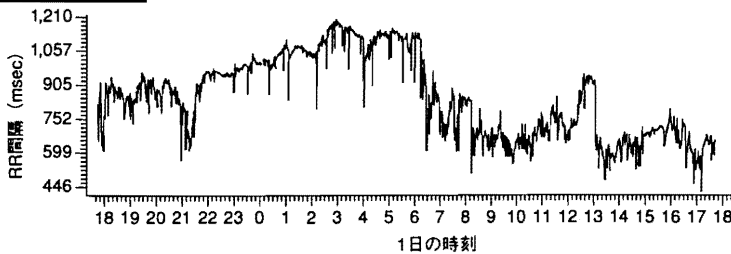
(文献14より引用)

図3 スペクトル解析の基本的な考え方

スペクトル解析



平均RR間隔



Minimum : 446 msec
 Maximum HR : 134 BPM
 Epoch ending : 17:12-Day 2

Maximum : 1,210 msec
 Minimum HR : 50 BPM
 Epoch ending : 02:53 Day 2

Mean : 820 msec
 Mean HR : 73 BPM

上段：24時間心電図RR間隔の時系列データを5分間隔でスペクトル解析したもの
 下段：平均RR間隔の時系列データ

夜間にはHF成分パワーの増加が著しい
 (文献2, 4頁より一部加筆して引用)

図4 日常生活中心拍変動のパワースペクトル解析 (61才女性の例)

関係の指摘や¹⁸⁾、逆に副交感神経機能を高めることにより、心臓病患者の予後が改善されるとの事例が報告されている^{12) 17) 19)}。

また、体位変化に関しては、起立により血液が下半身に移動すると、循環血流量の減少により血圧が低下するが、これを補正すべく圧受容器反射が正常に作動すれば、血圧はほぼ不変、心拍数は微増するとされる (Head-up tilt 試験)¹⁶⁾。体位変換に伴う心拍変動解析によれば、臥位での副交感神経優位の状態が、立位により交感神経優位にシフトする様子がはっきり観察される (図5)。起立性低血圧の診断に用いられてきたこれらの諸テストは、自律神経機能を介したコンディショニングの把握に有用な情報を提供することが期待される。但し、女性では、エストロゲン等の卵巣ホルモンが、心臓副交感神経調節に関与しているとの報告があり、心拍変動の解釈に際して生理周期に伴う変動を考慮する必要性が示唆されている^{3) 13)}。

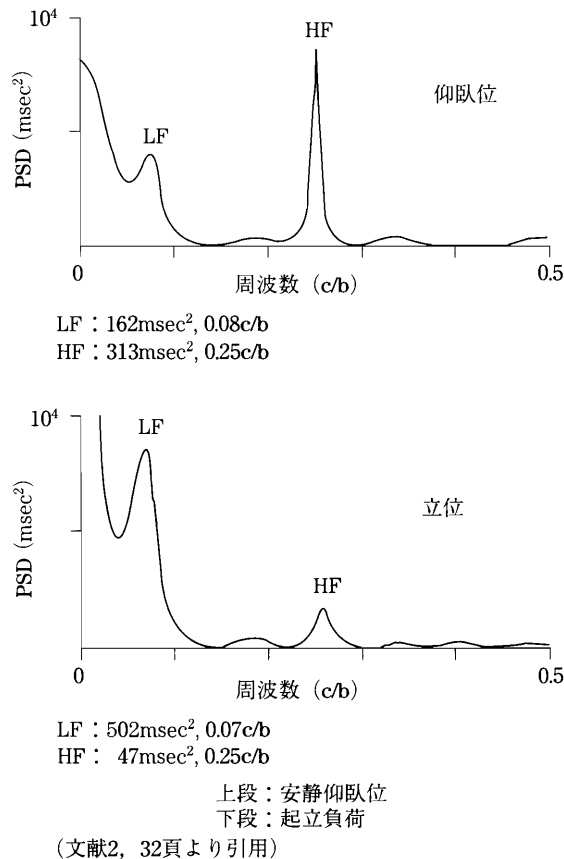


図5 起立負荷によるパワースペクトル密度関数の変化

その他、一般にTrainedではSedentaryに比して副交感神経の緊張がより亢進しており、日常的な身体活動が心拍変動の諸指標に影響するとの報告や²⁾、加齢の影響についての研究結果が示されているが²¹⁾、いずれも定説とするには至っていない。

臨床応用に比し、心拍変動の機序の解明には未解決の課題が山積しているが、自律神経系の活動を表す様々なスタンダードと心拍変動解析の諸指標との相関関係を検証することにより、将来的にさらに妥当性を高めることが期待されている。

オーバートレーニング症候群を始めとしたアスリートのコンディションとの関係においても、従来の研究成果と、対象となる現象に対する経験的な知見を踏まえて考察をすすめるべきであると思われる。

文 献 表

- 1) Fry Rod W., Morton A. R., Keast D. (1991) Overtraining in Athletes, An Update. Sports Medicine. 12 (1) : 32-65
- 2) 林 博史 (1991) 心拍変動の臨床応用—生理学的意義, 病態評価, 予後予測—, 第1版, 医学書院: 東京. pp. 1-36, 136-138
- 3) 林貢一郎, 中村真理子, 相沢勝治, 村井文江, 目崎登 (2002) 月経周期に伴い顔面冷却刺激に対する心臓副交感神経応答は変化する, 体力科学51 : 437-446
- 4) 稲光哲明, 呉 越, 三宅夕美, 久保千春 (2000) 慢性疲労性症候群にみられる自律神経異常一起立試験と心拍変動スペクトル解析による検討—, 米子医学雑誌51, 6 : 244-250
- 5) 川島均 (2000) 脳内代謝と心身の疲労—オーバートレーニング時の視床下部CRH—, 体育の科学50, 2 : 104-109
- 6) Israel S. (1976) Zur Problematik des Uebertrainings aus internistischer und Leistungsphysiologischer Sicht. MEDIZIN UND SPORT, 16 : 1-11
- 7) 亀谷学 (1992) 自律神経評価法, 臨床スポーツ医学9, 8 : 854-857
- 8) Koch J., Koch H. G. (1985) Hart trainiert und doch verloren? —Sportphysiologie—. TR-Verlagsunion : Muenchen
- 9) Kreider R. B. et al (ed) 川原貴 河野一朗 辻秀一編訳 (2001) スポーツのオーバートレーニング, 初版, 大修館書店: 東京. pp. 382-390
- 10) 久保田勝明, 室崎益輝 (2000) ストレスを加えた防災訓練時の生理的指標と心理的指標の関係, 日本建築学会計画系論文集 536, 1-6 : 1-6
- 11) Kuipers H., Keizer H. A. (1988) Overtraining in Elite Athletes, Review and Directions for the future. Sports Medicine. 6 : 79-92
- 12) La Rovere M. T., Martara A., Sandrone G., Lombardi F. (1992) Autonomic Nervous System Adaptations to Short-term Exercise Training. CHEST. 101, 5 : 299-303
- 13) 中村真理子, 林貢一郎, 相沢勝治, 村井文江, 目崎登 (2002) 若年女性の月経周期に伴う心臓自律神経活動動態, 体力科学51 : 307-316

- 14) 中村好男, 山本義治 (1991) 心拍変動のスペクトルとフラクタル, 体育の科学41, 7 : 515-523
- 15) 中村好男 (2001) 心拍変動を用いた自律神経活動評価法, 運動と循環—研究の現状と課題— (加賀谷・中村編) 第1版1-6. NAP : 東京. pp. 93-106
- 16) 日本自律神経学会編 (2000) 自律神経機能検査, 第3版, 文光堂 : 東京. pp. 90-96
- 17) 松永篤彦, 中村彩, 増田卓, 川端良治, 岩井貴美, 永尾久美子, 幸田誠, 笠原西介, 佐藤清貴, 和泉徹 (2002) 急性心筋梗塞患者の早期エルゴメータトレーニングにおける適応過程の検討—トレーニング導入初期の自律神経活動について—第37回日本理学療法学会大会抄録 (7月) 静岡
- 18) 大成浄志, 林由紀子, 川口浩太郎 (2002) 自律神経機能と突然死, 臨床スポーツ医学19, 8 : 865-871
- 19) 佐藤真治, 高橋真由香, 牧田茂 (2002) 冠動脈バイパス術後患者の心臓リハビリテーションにおける運動後心拍数減衰応答 (T30) の変化, 体力科学51 : 275-282
- 20) 佐藤真治, 牧田茂, 高橋真由香, 間嶋満 (2002) 冠動脈バイパス術後患者の急性期心臓リハビリテーションにおける気分・感情の変化と自律神経機能との関連, 心臓リハビリテーション7, 1 : 100-103
- 21) Schuit A. J, Ludovic G. P. M., Amelvoort V., Verrheij T. C., Rijneke R. D., Maan A. C., Swenne C. A., Schouten E. G. (1999) Exercise training and heart rate variability in older people. Med.Sci. Sports Exerc. : 816-821
- 22) 菅原順, 湯川英昭, 白井克佳, 斎藤実, 鍋倉賢治, 松田光生 (2000) アスリートにおける運動負荷後の心臓副交感神経系活動応答を用いた体調評価の有用性, 体育学研究45 : 611-618
- 23) 高田英臣 (1992) オーバートレーニングにおける自律神経, 臨床スポーツ医学9, 8 : 893-895
- 24) 高木洋, 佐藤磐男 (1992) スポーツにおける心臓自律神経, 臨床スポーツ医学9, 8 : 859-863
- 25) 鳥羽泰光 (2002) 慢性疲労を防ぐトレーニング処方, 体育の科学52, 3 : 209-214
- 26) Urhausen A., Gabriel H., Kindermann W. (1995) Blood Hormones as Markers of Training Stress and Overtraining. Sports Medicine 20 (4) : 251-276
- 27) Uusitalo A. L. T., Uusitalo A. J., Rusko H. K. (2000) Heart Rate and Blood Pressure Variability During Heavy Training and Overtraining in the Female Athlete. Int J Sports Med 21 : 45-53
- 28) Vogel R., Marti B., Held T., Seiler R., Hoppeler H. (2001) Mood Scores and Orthostatic Test as Predictors of Overreaching a 9-Month Observational Study. Abstract 15th ECSS-Congress July
- 29) 渡辺裕志, 佐藤徳太郎, 中村隆一 (1992) 運動における自律神経, 臨床スポーツ医学9, 8 : 849-853
- 30) 山本義春 (1995) 生体にみられる“ゆらぎ” J. J. SPORTS. SCI. 14-5. 471-474