

疲労およびオーバートレーニング症候群の
評価方法に関する研究
—心電図周波数解析を活用した新たな評価方法の検討—

福岡大学 田上 友季也
(共同研究者) 医薬基盤国立 畑本 陽一
健康・栄養研究所
福岡大学 上原 吉就

**Estimation of Training Fatigue and Overtraining:
Examination of a New Method Using Electrocardiogram Frequency Analysis**

by

Yukiya Tanoue, Yoshinari Uehara
Fukuoka University
Yoichi Hatamoto
*National Institute of Health and Nutrition,
National Institutes of Biomedical Innovation,
Health and Nutrition*

ABSTRACT

The autonomic nervous component obtained from heart rate variability can potentially be used to estimate overtraining. However, no method has been established to estimate temporary training fatigue using heart rate variability. We examined whether the autonomic nervous component response for exercise load can estimate temporary training fatigue. Five participants (age: 21.2 ± 0.8 yrs; height: 174.6 ± 2.5 cm; weight: 62.5 ± 6.0 kg; maximal oxygen uptake [$\dot{V}O_2\text{max}$]: 44.5 ± 5.8 ml/kg/min) completed sprint training for 5 days at 70% of each participant's maximum sprint speed. Heart rate variability was measured during exercise load at the lactate threshold for 5 min

using an electrocardiogram before and after training for 5 days. Heart rate variability was automatically translated into the autonomic nervous component using automatic frequency analysis (low-frequency power [LF], high-frequency power [HF], LF/HF). Feelings of fatigue were measured using the Visual Analogue Scale (VAS) after exercise load before and after sprint training for 5 days. Feelings of fatigue after exercise load increased after training compared with that before training ($p < 0.05$). Moreover, feeling fatigued was correlated with a decreased LF component during exercise load (reflecting sympathetic nervous and parasympathetic nervous activities; $r = -0.988$, $p < 0.05$). HF (parasympathetic nervous activity) and LF/HF (sympathetic nervous activity) during exercise load were not correlated with feeling fatigued after exercise load (HF: $r = -0.082$, $p = 0.895$; LF/HF: $r = -0.424$, $p = 0.477$). The autonomic nervous component (LF) response for exercise load can potentially be used to estimate temporary training fatigue.

要 旨

アスリートにおいてオーバートレーニング症候群の発症は未然に防ぐことが重要であるが、一時的な疲労状態を評価するための有効な方法は確立されていない。そこで本研究では5日間のトレーニングを実施し、乳酸閾値強度の運動負荷によって起こる心拍変動の自律神経成分の応答から一時的なトレーニング疲労を評価できるかどうかを明らかにすることを目的とした。

乳酸閾値強度の運動負荷を5分間行った後の疲労感・倦怠感は5日間のトレーニング前と比較してトレーニング後に有意に上昇した ($p < 0.05$)。さらに、運動負荷後の疲労感・倦怠感と運動負荷による自律神経成分の応答との関係性を検証したところ、運動負荷後の疲労感・倦怠感と運動負荷による自律神経成分（交感神経および副交感神経を反映する低周波成分）の反応量との間に有意な負の相関関係が認められた ($r = -0.988$, $p = 0.002$ [6日目])。

したがって、運動負荷による自律神経成分の応答から一時的なトレーニング疲労を評価できるこ

とが示唆された。

緒 言

トレーニングはアスリートのパフォーマンスの向上を促す。その一方で、トレーニングと休養・リカバリーのバランスが崩れると疲労の蓄積やパフォーマンスの低下を引き起こし、最悪の場合、オーバートレーニング症候群を発症する。オーバートレーニング症候群とは、トレーニングによる身体的・精神的ストレスなどの蓄積により、長期にわたる運動パフォーマンスの低下を来す。さらに、適切な休息を確保した場合であっても、症状の回復には少なくとも数週間から数か月以上を要するものと定義されている。

近年、オーバートレーニング症候群の診断・評価方法の1つとして心拍変動を用いた方法が注目されている。心拍変動とは心拍1拍1拍の揺らぎのことである。この揺らぎを周波数解析することにより、副交感神経活動を反映する高周波成分 (High-frequency power : HF) と副交感神経及び交感神経を反映する低周波成分 (Low-frequency power : LF) を得ることができる^{1,2)}。また、交

感神経活動の指標としてはLFをHFで除したものの(LF/HF)が広く用いられている³⁾。心拍変動は心電のみで測定できるため非侵襲的な方法として注目されている。オーバートレーニング症候群のアスリートは心拍変動から得られる自律神経成分のバランスが崩れていることが報告されており⁴⁾、自律神経成分がオーバートレーニング症候群の診断指標となりうることが示唆されている^{4,5,6)}。しかし、アスリートにおいては早期の段階で疲労を評価し、オーバートレーニング症候群の発症を未然に防ぐことが重要である。自律神経成分を用いたトレーニング疲労の評価方法は未だ確立されておらず、エビデンスの構築と更なる検証が必要である。

従来、心拍変動の測定は安静下で行われることが多い。しかし、安静下では心拍変動が呼吸や姿勢、睡眠状況など様々な影響を大きく受けるため⁷⁾、オーバートレーニングには満たない通常のトレーニング疲労の状態では一時的なトレーニング疲労を検出することが難しいと考えられる。一方、運動負荷を用いてオーバートレーニング症候群やその予備軍の評価を試みた研究がある^{8,9)}。Meeusenらは2回の最大運動によってオーバートレーニング症候群の生体ホルモンの反応性の違いを示し、運動負荷を用いた方法の有用性を示唆している⁸⁾。運動負荷を用いることにより、心拍変動に与える呼吸や姿勢などの影響を少なくでき、トレーニング疲労に対する反応を検出できると考えられる。しかし、運動負荷の方法を用いて自律神経成分の反応からトレーニングによる疲労状態を評価できるかは明らかではない。

そこで本研究はトレーニング疲労を評価する新たな方法として運動負荷による自律神経成分の応答から一時的なトレーニング疲労を評価できるかを検証する。

1. 方法

1. 1 対象者

本研究では運動習慣のない5名(年齢:21.2±0.8歳, 身長:174.6±2.5cm, 体重:62.5±6.0kg, 最大酸素摂取量:44.5±5.8ml/kg/min)の健康成人男性を対象とした。対象者はスプリント運動を行うトレーニング条件と通常生活下のコントロール条件の2条件をクロスオーバー法にてランダム化を行い実施した。両条件は1週間以上の期間をあけて実施した。インフォームド・コンセントとして研究の目的や内容, リスク等を口頭にて十分に説明を受け, 書面にて同意を得られたものを対象者とした。本研究は福岡大学研究倫理委員会の承認を受け, 実施した(承認番号:19-04-01)。

1. 2 事前測定

1. 2. 1 運動負荷試験

本研究では、体力レベルおよび乳酸性作業閾値(Lactate threshold: LT)の判定のために自転車エルゴメータ(CORIVAL cpet, Lode B.V., Groningen)を用いたランプ式漸増運動負荷試験を実施した。ウォーミングアップを10Wの負荷で1分間行い、毎分20Wの漸増負荷により疲労困憊に至るまで実施した。ペダルの回転数は1分間に60回転とした。運動負荷試験中は生体ガス分析用質量分析装置による酸素摂取量の測定(ARCO2000, アルコシステム, 千葉)を行い、最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を算出した。運動負荷試験中の血中乳酸濃度(ラクテート・プロ2 LT-1730, アークレイ, 京都)の測定は30秒毎に4mmol/Lに到達するまで実施した。LTは血中乳酸濃度の急増点とし、5人の熟練した検者によって判定され、その最大値と最小値を除外した3人の判定値の平均をLTとした。

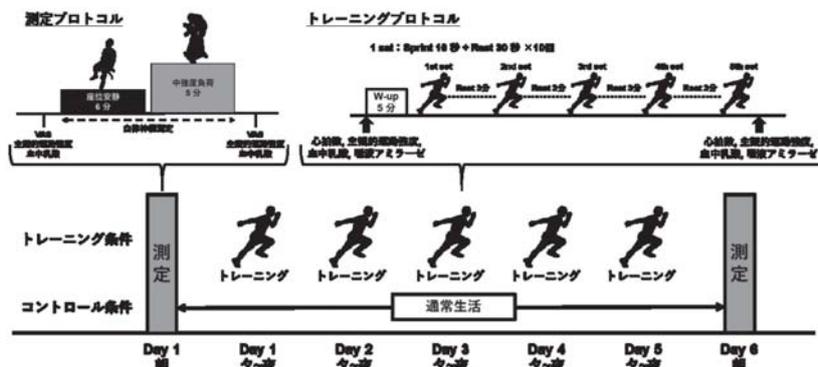


図1 プロトコル

1. 2. 2 走スピードの決定

スプリント運動の走スピードは50m走のタイムから算出した。50m走は3本行い、その平均値を最大スピードとし、最大の70%のスピードをスプリント運動の走スピードとした。ウォーミングアップのスピードは最大スピードの30%のスピードとした。50m走の各測定間は3分以上の休息をとった。

1. 3 プロトコル

本研究のプロトコルは図1に示す。本研究ではクロスオーバー法を用いてトレーニング条件とコントロール条件（通常生活下）の2条件を実施した。トレーニング条件ではトレッドミル（Super treadmill, Woodway, Waukesha）を用いて、スプリント運動を夕方から夜の時間帯に5日間実施した。初めに最大スピードの30%スピードで5分間ウォーミングアップを行った後に、最大スピードの70%スピードでスプリント運動を実施した。スプリント運動は10秒間スプリント+30秒間休息を1回とし、1セット10回、計5セットを5日間実施した。コントロール条件では5日間通常生活を送るように指示した。各条件の1日目とトレーニングまたは通常生活が終了した翌日6日目の朝に心拍変動の測定を実施した。実験期間中はできるだけ同じ生活リズムで過ごし、飲酒やプロトコル以外の激しい運動は控えるように指示した。また、就寝と起床の時間は合わせるように指示した。

1. 4 心拍変動測定および周波数解析

3誘導の心電を用いて各条件の1日目及び6日目の朝に座位安静時および運動負荷時に心拍変動の測定を実施した（図1）。初めに6分間の座位安静で心拍変動の測定を行い、その後自転車エルゴメータを用いてLTに相当する強度で5分間の運動負荷中の心拍変動の測定を実施した。心拍変動は連続リアルタイム周波数解析により自律神経成分（LF, HF, LF/HF）が連続的に算出された（HRR-01, クロスウェル社, 横浜）。心拍変動の測定中は呼吸のタイミングや深さの指示は行わず、対象者に任せた。また、姿勢は一定に保つよう指示した。

座位安静中の自律神経成分は座位安静6分間のうち2-5分の値を採用し、平均値を算出した。運動負荷中の自律神経成分は運動負荷5分間のうち運動終了10秒前から運動終了時までの値を採用し、平均値を算出した。また、本研究では運動負荷時の自律神経成分から座位安静時の自律神経成分を差し引いた値（運動負荷-座位安静）を運動負荷による自律神経成分の反応量とした。

1.5 Visual Analogue Scale (VAS) を用いた疲労度の測定

VASを用いて疲労感・倦怠感の測定を行った。VASの測定は、心拍変動測定の運動負荷前後に実施した。VASは全く疲労のない状態を0mm,

高い疲労状態を100mmとして、現在の疲労度が100mmの直線上のどの位置にあるかで疲労感・倦怠感について評価した。

1. 6 心拍数, 血中乳酸濃度, 唾液アミラーゼ濃度, 主観的運動強度の測定

スプリント運動の強度を評価するために、心拍数 (RS800CX, POLAR, Finland), Borg Scaleによる主観的運動強度, 血中乳酸濃度 (ラクテート・プロ2 LT-1730, アークレイ, 京都), 唾液アミラーゼ濃度 (唾液アミラーゼモニター, ニプロ, 大阪) の測定をトレーニング条件のスプリント運動前後に実施した。

1. 7 呼吸数

心拍変動は呼吸の影響を大きく受けるため、Breath by Breath法を用いて生体ガス分析用質量分析装置 (ARCO-2000, アルコシステム, 千葉) により、心拍変動測定中の呼吸数を測定し、平均値を算出した。

1. 8 統計解析

すべてのデータは、平均値±標準偏差で示した。本研究では、すべてのデータにおいて対応のあるt検定を用いて各条件の1日目と6日目を比較した。また、トレーニングによる疲労感・倦怠感と自律神経成分との関係を明らかにするために、各条件におけるトレーニング終了翌日 (6日目) の運動負荷による自律神経成分の反応量と運動負荷後の疲労感・倦怠感との相関係数を算出した (SPSS ver. 20, SPSS Inc)。すべての検定における統計学

的な有意水準は5%未満とした。

2. 研究結果

全対象者において、5日間すべてのスプリント運動を終了した。スプリント運動の平均走スピードは、18.2±1.7km/hであった。

2. 1 スプリント運動前後の生理学的指標の変化 (心拍数, 主観的運動強度, 血中乳酸濃度, 唾液アミラーゼ濃度)

トレーニング条件におけるスプリント運動前後の5日間の心拍数, 主観的運動強度, 血中乳酸濃度, 唾液アミラーゼ濃度の結果をそれぞれ表1に示す。心拍数, 主観的運動強度および血中乳酸濃度は5日間すべてにおいてスプリント運動前と比較してスプリント運動後で有意に上昇した。唾液アミラーゼ濃度は4日目においてスプリント運動前と比較してスプリント運動後で有意に上昇したが、その他の日においてはスプリント運動前後に統計学的な有意な差は認められなかった。

2. 2 疲労感・倦怠感

運動負荷前後の疲労感・倦怠感を図2に示す。運動負荷前の疲労感・倦怠感においてトレーニング条件およびコントロール条件で1日目と6日目の間に変化は認められなかった。一方、運動負荷後の疲労感・倦怠感はトレーニング条件の1日目に比べ6日目において有意に上昇した。コントロール条件では1日目と6日目の間に有意な変化は認められなかった。

表1 5日間のスプリント運動前後の生理学的指標の変化

項目	Day1		Day2		Day3		Day4		Day5	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
心拍数(拍/分)	73±4	164±17*	75±7	164±21*	72±8	164±19*	74±8	160±18*	77±9	158±16*
主観的運動強度	7±1	15±2*	6±1	14.2±3*	7±1	15.4±2*	6±1	14.8±1*	6±1	14.4±2*
血中乳酸濃度(mmol/L)	1.2±0.2	3.2±0.7*	1.1±0.1	3.1±1.2*	1.0±0.2	3.2±1.7*	1.1±0.3	2.9±1.3*	1.0±0.2	2.9±1.2*
唾液アミラーゼ(kIU/L)	19.8±9.5	25.6±12.6	22.2±11.0	39.8±16.0	31.4±10.2	32.2±10.9	27.2±7.3	33.6±6.8*	21.8±4.4	27.8±10.0

平均値±標準偏差。前はスプリント運動前の値を示し、後はスプリント運動後の値を示す。*p<0.05vs前

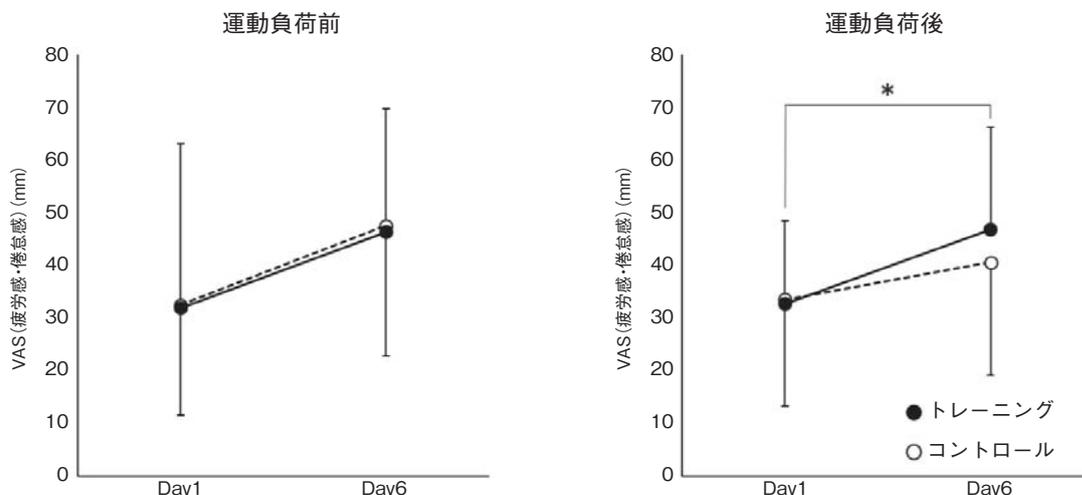


図2 運動負荷前後の疲労感・倦怠感における5日間のトレーニング前後の変化
Day1はトレーニング前, Day6はトレーニング後を示す. * p < 0.05 vs Day1

2. 3 呼吸数

座位安静 (トレーニング条件: 16±2回/分 [1日目] vs 16±1回/分 [6日目], コントロール条件: 15±1回/分 [1日目] vs 15±2回/分 [6日目]) 及び運動負荷 (トレーニング条件: 23±1回/分 [1日目] vs 23±3回/分 [6日目], コントロール条件: 23±4回/分 [1日目] vs 24±2回/分 [6日目]) 時の心拍変動測定時における呼吸数は各条件の1日目および6日目に有意な差は認められなかった。この結果から, すべての心拍変動測定時の呼吸数

は同じであったことが示された。

2. 4 5日間のトレーニング前後の自律神経成分

2. 4. 1 座位安静時および運動負荷時の自律神経成分

5日間のトレーニング前後の自律神経成分と生理学的指標の結果は表2に示す。座位安静および運動負荷-座位安静 (運動負荷による自律神経成分の反応量) の心拍数, LF, HF, LF/HFはトレーニング条件とコントロール条件において1日目と

表2 5日間のトレーニング前後の自律神経成分及び生理学的指標の変化

項目	コントロール(通常生活)		トレーニング	
	Day1	Day6	Day1	Day6
自律神経成分				
座位安静				
心拍数(拍/分)	63.9 ± 6.2	66.5 ± 8.6	68.7 ± 6.5	64.4 ± 9.3
LF(ms ²)	1128 ± 759	790 ± 796	497 ± 375	694 ± 423
HF(ms ²)	566 ± 438	368 ± 162	318 ± 319	529 ± 392
LF/HF	2.9 ± 2.1	2.6 ± 2.8	2.6 ± 1.5	3.0 ± 3.9
運動負荷-座位安静				
心拍数(拍/分)	58.5 ± 9.6	58.4 ± 12.3	53.7 ± 12.0	56.1 ± 11.8
LF(ms ²)	-1103 ± 779	-778 ± 795	-444 ± 425	-656 ± 466
HF(ms ²)	-545 ± 464	-358 ± 167	-301 ± 331	-508 ± 399
LF/HF	10.1 ± 11.6	7.1 ± 10.3	5.8 ± 9.4	2.1 ± 5.6
生理学的指標(運動負荷後)				
主観的運動強度	9 ± 1	10 ± 2*	10 ± 1	10 ± 1
血中乳酸濃度(mmol/L)	1.8 ± 0.3	1.6 ± 0.2	1.8 ± 0.5	1.7 ± 0.4

平均値 ± 標準偏差。LFは低周波成分(Low-frequency), HFは高周波成分(High-frequency)を示す。運動負荷-座位安静は運動負荷時の値から座位安静時の値を引いて運動負荷による自律神経成分の応答を評価した。生理学的指標は運動負荷後の値を示した。*p < 0.05 vs Day1

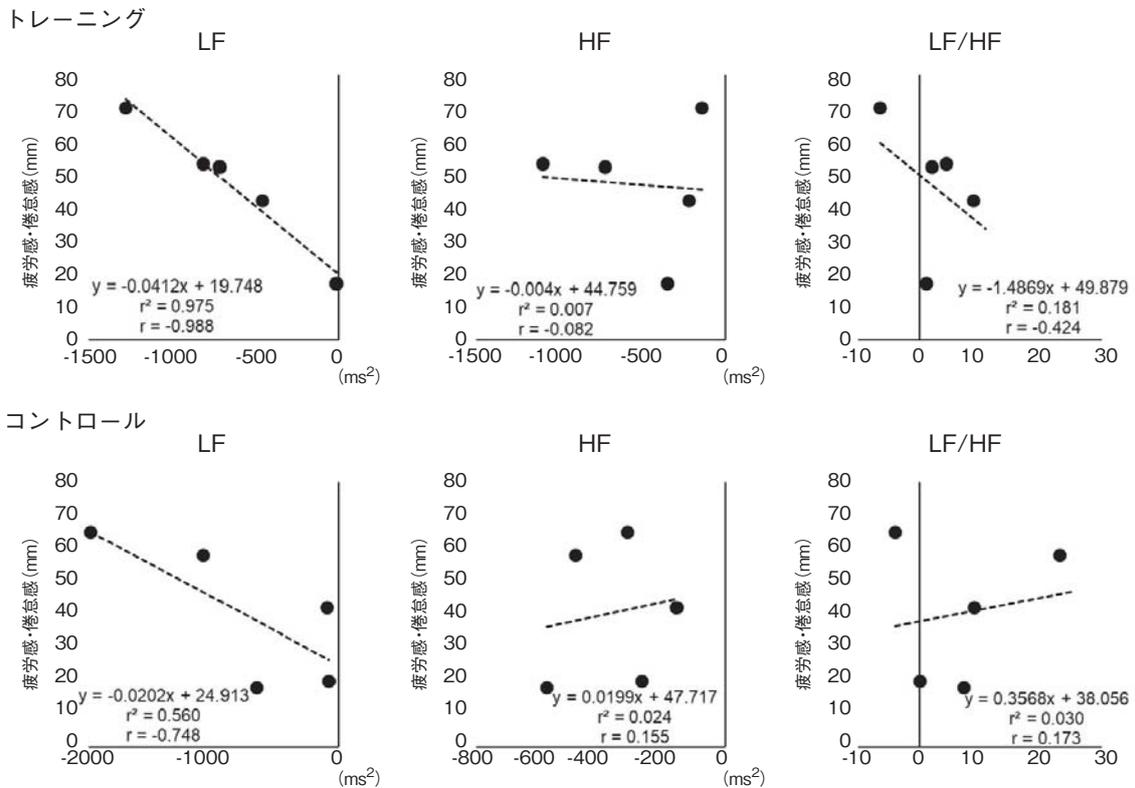


図3 トレーニングを終了した翌日(6日目)の疲労感・倦怠感と自律神経成分との相関係数
 上段はトレーニング条件, 下段はコントロール条件(通常生活)の運動負荷後の疲労感・倦怠感と運動負荷による自律神経成分の反応(運動負荷-座位安静)との相関を示す。

6日目に有意な差は認められなかった。

生理学的指標は運動負荷後の結果を示す。運動負荷後の主観的運動強度においてコントロール条件で1日目と比較して6日目で有意に高かった。トレーニング条件においては1日目と6日目に有意な差は認められなかった。血中乳酸濃度は両条件において1日目と6日目に有意な差は認められなかった。

2. 4. 2 運動負荷による疲労感・倦怠感と自律神経応答の関連性

疲労感・倦怠感と自律神経成分との相関を図3に示す。トレーニングが終了した翌日6日目の運動負荷後の疲労感・倦怠感と運動負荷によるLF成分の減退量との間に有意な負の相関関係が認められた(LF: $r = -0.988$, $p = 0.002$)。しかし、通常

生活下のコントロール条件では有意な相関関係は認められなかった(LF: $r = -0.748$, $p = 0.146$)。また、運動負荷によるHF成分およびLF/HFの反応量は両条件において運動負荷後の疲労感・倦怠感との相関関係は認められなかった(HF: $r = -0.082$, $p = 0.895$, LF/HF: $r = -0.424$, $p = 0.477$ [トレーニング条件], HF: $r = 0.155$, $p = 0.804$, LF/HF: $r = 0.173$, $p = 0.780$ [コントロール条件])。

3. 考 察

本研究では、心拍変動から得られる自律神経成分を用いて運動負荷による自律神経成分の応答から一時的なトレーニング疲労を検出できるかどうかを検証した。5日間のトレーニングによる疲労感・倦怠感は運動負荷により出現することが明らかとなり、それは運動負荷によるLF成分の減退

にとの間に負の相関が認められた。このことから、運動負荷による自律神経成分の反応からトレーニング疲労を評価できることが示唆された。

本研究において、運動負荷を行う前の疲労感・倦怠感（図2）や自律神経成分（表2）は5日間のトレーニングによって有意な変化は認められなかった。しかしながら、運動負荷を行った後の疲労感・倦怠感においてはトレーニング条件のみで1日目と比較して6日目に有意な上昇が認められた。本研究の心拍変動測定時の運動負荷後の主観的運動強度と血中乳酸濃度は各条件の1日目と6日目において変わらなかったことから（表2）、心拍変動の測定において運動負荷による身体的負担は同様であったと考えられる。つまり、運動負荷の身体的負担は同じであったにもかかわらず1日目と6日目の疲労感・倦怠感が異なる結果であったことは、運動負荷を行うことによって運動負荷を行わなかった時には検出できなかった一時的なトレーニング疲労を検出できる可能性が示された。また、トレーニング条件における6日目の運動負荷後の疲労感・倦怠感は運動負荷によるLF成分の減退量と高い相関関係にあることが明らかとなった（図3）。先行研究においても疲労感を感じているアスリートは疲労感を感じていないアスリートと比較し、LF成分が低いという報告があり⁶⁾、LF成分の減退は疲労感と関連がある可能性がある。またLF成分は圧受容器反射を反映するとされており¹⁰⁾、スプリント運動が血管のステイフネスを上昇させ¹¹⁾、圧受容器反射を低下させた可能性が考えられる。しかし、LF成分の減退の程度が疲労感・倦怠感にどのような影響を及ぼしているのかは明らかではなく、LF成分と疲労感の関連については今後、詳細な説明が必要である。

本研究においてはいくつかの限界がある。一つは本研究の自律神経成分の結果には非常にばらつきが大きかったことから、自律神経成分において

統計学的な有意な変化が認められなかったと考えられる。本研究では心拍変動に大きく影響を与える呼吸数の測定を行っているが、すべての測定において呼吸数は変わらなかった。さらに各条件間で就寝時間や起床時間を合わせたにもかかわらず、個人内および個人間のばらつきが非常に大きい結果となった。その要因として睡眠の質や日常生活における活動量などが影響している可能性があり、今後のこれらの測定および詳細な解析を進めていく必要がある。また、本研究でのサンプルサイズが小さく（n=5）、心拍変動から得られる自律神経成分のばらつきが大きいことから、本研究のサンプルサイズは統計学的な解析に大きく影響を及ぼしたことが考えられる。今後さらにサンプルサイズを増やしていく必要がある。

4. 結 論

本研究では、運動負荷によるLF成分の減退応答から一時的なトレーニングによる疲労の蓄積を検出できることが示唆された。これはトレーニングによる疲労度合を評価する新たな手法となる可能性がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、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厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり参加して頂いた対象者の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Akselrod S., Eliash S., Oz O., Cohen S., Hemodynamic regulation: investigation by spectral analysis, *Am. J. Physiol. Circ. Physiol.*, 253: H176-H183(1985)
- 2) Randall D.C., Brown D.R., Raisch R.M., Yingling J.D., Randall W.C., SA nodal parasympathectomy delineates autonomic control of heart rate power spectrum, *Am. J. Physiol. - Hear. Circ. Physiol.*, 260:

- H985-H988(1991)
- 3) Pagani M., Lombardi F., Guzzetti S., Rimoldi O., Furlan R., Pizzinelli P., Sandrone G., Malfatto G., Dell'Orto S., Piccaluga E., Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog, *Circ. Res.*, **59**: 178-193(1986)
 - 4) Mourot L., Bouhaddi M., Perrey S., Cappelle S., Henriot M.-T., Wolf J.-P., Rouillon J.-D., Regnard J., Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincare plot analysis, *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, **24**: 10-18(2004)
 - 5) Pichot V., Busso T., Roche F., Garet M., Costes F., Duverney D., Lacour J., Barthelemy J., Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study, *Med. Sci. Sport Exerc.*, **34**: 1660-1666(2002)
 - 6) Schmitt L., Regnard J., Desmarests M., Mauny F., Mourot L., Fouillot J.P., Coulmy N., Millet G., Fatigue Shifts and Scatters Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes, *PLoS One*, **8**(2013)
 - 7) Achten J., Jeukendrup A.E., Heart Rate Monitoring, *Sport Med.*, **33**: 517-538(2003)
 - 8) Meeusen R., Nederhof E., Buyse L., Roelands B., De Schutter G., Piacentini M.F., Diagnosing overtraining in athletes using the twobout exercise protocol, *Br. J. Sports Med.*, **44**: 642-648(2010)
 - 9) Meur Y. Le, Hausswirth C., Natta F., Couturier A., Bignet F., Vidal P.P., A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes, *J. Appl. Physiol.*, **114**: 411-420(2013)
 - 10) Goldstein D.S., Benth O., Park M.Y., Sharabi Y., Low-frequency power of heart rate variability is not a measure of cardiac sympathetic tone but may be a measure of modulation of cardiac autonomic outflows by baroreflexes, *Exp. Physiol.*, **96**: 1255-1261(2011)
 - 11) Rakobowchuk M., Stuckey M.I., Millar P.J., Gurr L., MacDonald M.J., Effect of acute sprint interval exercise on central and peripheral artery distensibility in young healthy males, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **105**: 787-795(2009)