

臨床スポーツ医学

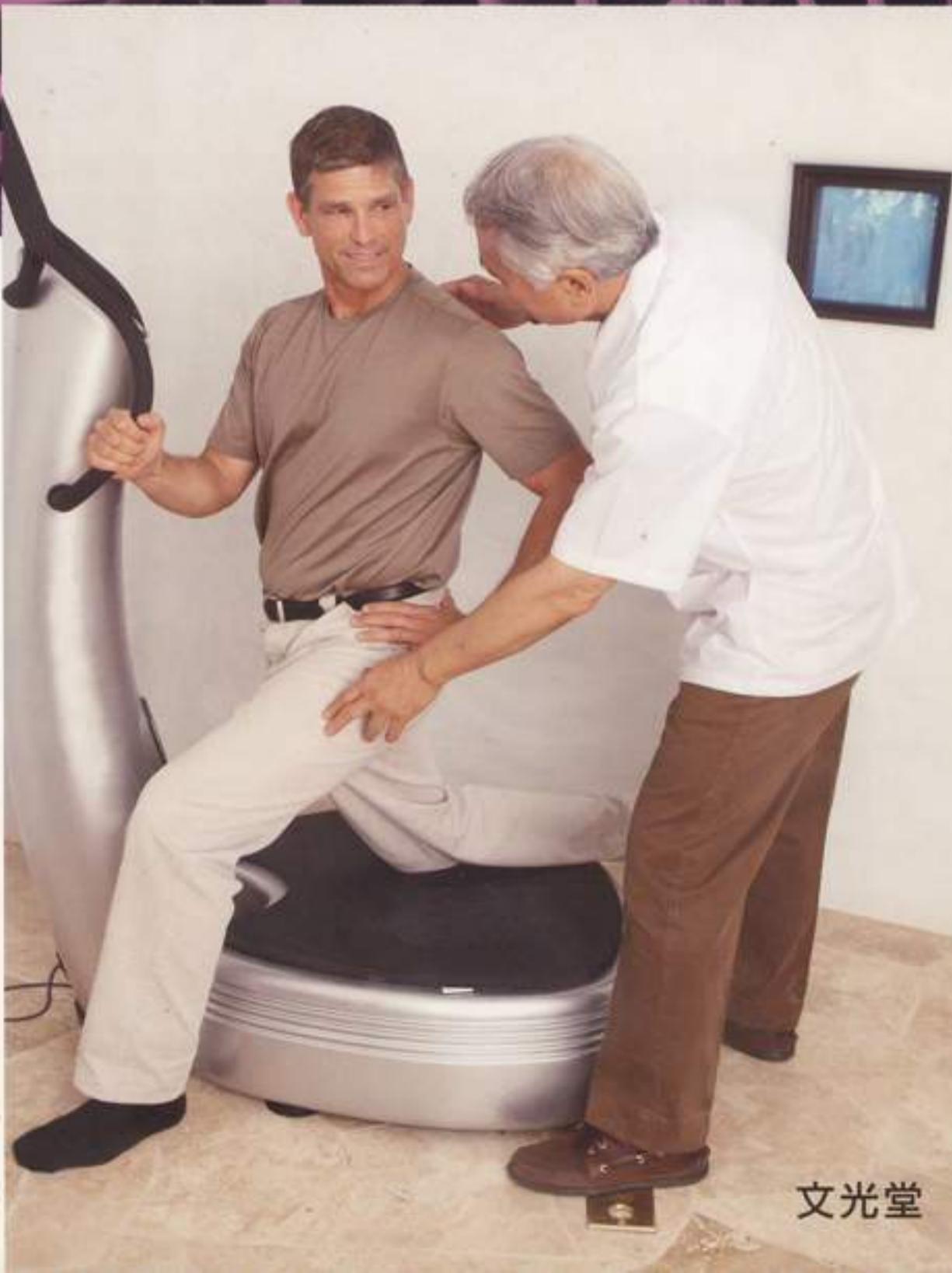
The Journal of Clinical Sports Medicine

特集・ 加速度トレーニング

-スポーツ医学分野での有用性-

特集編集：田中喜代次（筑波大学教授）
福林 徹（早稲田大学教授）

- 加速度トレーニングの基礎理論と基礎的研究
- 動的バランスに対する加速度トレーニングの効果
- 脳卒中片麻痺患者に対する
全身振動刺激としての加速度トレーニングの抗痙攣効果
- 血流・自律神経に対する
加速度トレーニングの意義
- whole-body vibrationを用いた
トレーニング・ストレッチの
プロスポーツ現場における有効性
- 3次元振動を導入した
加速度トレーニングの有用性
- 整形外科リハにおける
加速度トレーニングの臨床効果
- 一般高齢者に向けた
加速度トレーニングの有効性
- 加速度トレーニングを含む減量介入が
肥満者の健康・体力に及ぼす影響
- 全身振動による加速度トレーニング：
宇宙医学への応用
- 筋活動（筋電図）からみた
加速度トレーニング



血流・自律神経に対する加速度トレーニングの意義

末武信宏^{*1}, 小林弘幸^{*2}, 小林暁子^{*3}

はじめに

加速度トレーニングは従来型のトレーニングと比較していくつか特徴的な効果と身体への影響が期待できる。加速度トレーニングは垂直正弦波の3次元の振動を発生させるプレート上で行われる。筋肉へプレート上で生じる振動刺激が伝わり筋紡錘の一次終末から、 α 運動ニューロンを活性化させ、緊張性振動反射同様の筋収縮がプレート上での振動と同調して起こる。加速度トレーニングを長期間行うことにより、通常トレーニングを行わない若年男女、閉経後の女性の筋力、跳躍力の成績に従来型のレジスタンストレーニングと同等の増加が確認されている^{1~3)}。加速度トレーニングは他のトレーニング同様、高齢男性の等尺性および瞬発性膝伸展力と大腿部筋肉量を有意に増加させたという報告があるが、これは加速度トレーニングによって老化による筋骨格量減少を抑制もしくは、回復させる有効性を支持するものである。

このように加速度トレーニングが筋肉量や筋力を増強する報告はあるが、加速度トレーニングにおける生体への振動刺激は、皮膚血流や筋肉や内臓など組織血管内の血流、自律神経への影響も及ぼすことが知られている。

加速度トレーニングを行う振動システムとしてPower Plate[®] が国内では広く普及しているが、プレートの振動する周波数や振幅を変化させ、トレーニング以外にもマッサージ、ストレッチ、リラクセーションとしても使用が可能で生体への振動による影響が考慮される。筋骨、腱、靱帯への影響のみならず、加速度トレーニングが血流・自律神経に良好な影響を与える可能性が期待できる。

背景

組織血流は、生体組織の外傷からの治癒においてきわめて重要な要因であり、治癒期間は組織における血流の状態で変化する。良質で十分量の血流供給は創傷治癒に大きく寄与し、血管が豊富な、顔面、頭部、粘膜面は下腿や体幹部のような血管が乏しい身体部位と比較すると治癒が速いことが確認されている^{4,5)}。糖尿病患者、凍傷患者、高齢者における治癒の遷延は末梢血流の循環障害に起因すると考えられ、自律神経機能はストレス、老化、糖尿病、循環器障害などの疾患による影響を受ける。

末梢循環は、1) 筋肉内血流と、2) 皮膚血流に大きく分けられ、1) 神経系制御と、2) 血管局所制御(代謝状態)によりコントロールされている⁶⁾。主として、皮膚血流は神経調節⁶⁾、骨格筋内の血管運動は組織の代謝状態に関与している⁷⁾。トレーニング中、毛細血管が拡張し筋肉内血流を増大させる⁶⁾。筋肉血流はトレーニング強

*1 順天堂大学医学部病院管理学教室

*2 順天堂大学医学部付属順天堂医院総合診療科研究室

*3 小林メディカルクリニック東京

度によって変化する⁸⁾。自律神経の中でも交感神経系により調節される筋肉内の血管収縮は骨格筋への血流を制限して動脈圧の維持を行う⁸⁾。したがって、トレーニングに反応する骨格筋の血流は自律神経系(特に交感神経)と体性系とによる二つの系からの調節を同時に受ける^{8,9)}と考えられる。

加速度トレーニングは筋力および筋パフォーマンスの向上に影響を与える以外に末梢循環に変化を及ぼすことが報告されている¹⁰⁾。加速度トレーニングによって身体に負荷されたリズミカルな振動刺激は末梢循環に変化をもたらす一方、血圧や心拍数は変化させない¹⁰⁾。加速度トレーニングの有効性が報告される一方で、血管性運動神経障害のリスクが検討されている。いわゆる「振動誘発性レイノー現象」や「白蟻病」にみられる指の血流低下といったチェーンソーなどの振動工具を使用する者やオートレーサーなど職業上の高周波振動の悪影響同様、加速度トレーニングによる振動でも末梢血流低下が惹起される可能性を危惧する専門医もいる^{11,12)}。しかし、加速度トレーニングでは、使用する周波数領域が30~50Hzであり、身体へ有害な影響は、高周波数80~100Hzの振動で共振する工具で生じるため影響を受けないと考えられる¹³⁾。実際、周波数だけでなく振動振幅や身体の振動の曝露時間も問題となる要因になる。加速度トレーニングで使用されているシステムは安全性に十分配慮されて設計されたものである。

現在、全世界に普及している加速度トレーニングシステム Power Plate® は、アスリートのみならずエクササイズとして数多く導入されており、末梢循環障害の報告はない。低周波振動(周波数80Hz未満)とその末梢循環に対する効果に関する実験も報告されている¹²⁾。

このように現在、広く普及している加速度トレーニングは、安全性も高く高齢者の運動補助にも使用できるものであり、スポーツ分野のみならず医療分野においても注目されている。

加速度トレーニングが血流に及ぼす影響

皮膚血流における実験として、Lohmanらは、

45名(年齢18~43歳)の被験者を無作為に3群に割り付け加速度トレーニングによる皮膚血流の変化を次のように報告している。

第1群-加速度トレーニング、第2群-エクササイズ単独、第3群-振動単独。

レーザードプラ画像化法を用いて皮膚血流を、1) ベースライン、2) 介入直後、3) 介入から10分後の3時点測定した。

加速度トレーニングの振動刺激はPower Plate®によって与えた。Power Plate®は振動周波数が30~50Hzで可変的に設定できる振動プレートを組み込んだシステムであり、低振幅(2~3mm)と高振幅(5~6mm)のいずれかの振動振幅を選択できるが、振動周波数を30Hz、振動振幅を $a_0=5~6\text{mm}$ (高振幅)に設定して実験は行われた。

実験結果は、皮膚血流は振動単独群でのみ有意に増加、他の群ではむしろ低下した。下肢のエクササイズは加速度トレーニングの有無にかかわらず、皮膚血流を増大させることはなく、むしろ皮膚血流はやや減少した。この結果は、活動している筋肉内の血流要求が振動による皮膚血管の変化を示していることを示す⁶⁾。

皮膚血流が、このような等尺性エクササイズ後に短時間減少したが、エクササイズプログラムの心血管系に対する有意性が報告されている^{14,15)}。皮膚血流以外では、組織内の血管弛緩¹⁶⁾、骨密度¹⁷⁾、筋肥大¹⁸⁾にも影響を与えており、継続的なエクササイズによって、必要部位の血管は拡張し、血流が局所に集中する反応が起こる。刺激による筋肉活動中、筋肉内への血流の強い需要があった場合、筋肉内の血管は拡張し、血流は皮膚組織から筋組織へ向かう動態になる。運動生理学的反応により、二つのエクササイズ群では、皮膚血流が短時間減少したと考えられる。

マッサージでは、血行動態を大きく変化させないが^{19~21)}、皮膚血流を増大させることがわかっている。下肢へのマッサージは大腿部の血管内の血流、下腿の骨格筋群の血流を変化させずに皮膚血流を増大させることが報告されている²²⁾。血流の増大は酸化窒素(NO)が有意に増加するため起こると想定されている。

エクササイズの強度や振動周波数、姿勢、時間などによって徒手マッサージとは異なる加速度トレーニングのマッサージ効果が期待できると考えられる。

この結果から、Sackner ら²³⁾が報告している循環障害のある高齢者集団における所見と併せて考えると、エアロビックエクササイズが禁忌、実行不可能な集団において加速度トレーニングを適用できる可能性が指摘される。微小循環機能が低下している糖尿病患者は自律神経機能も低下している場合が多く、末梢血管収縮・拡張の調整能力の低下も考えられる。加速度トレーニングがもたらす糖尿病患者へのベネフィットとして、血流だけでなく自律神経への影響も考慮した場合、有用性が期待される。

加速度トレーニングにおける振動が自律神経への影響をもたらし、皮膚血流を増大させる最適な振動時間や周波数、振幅の実験に期待が持たれる。

加速度トレーニングが筋肉や皮膚血流量を単純に増加させるのではなく、組織の治癒や活性化に役立つ診療的研究を、我々の研究室でも行う予定であり、すでに末梢血流に対する加速度トレーニングの影響の実験結果を得ている。

また、動脈壁硬化度の増加は心血管系疾患の危険因子である。動脈に対する機械刺激により、動脈壁硬化度が急性に低下する。加速度トレーニングによる刺激は筋肉のみならず、脊椎まで伝播するため、加速度トレーニングにより腹部および下肢の動脈が振動によって刺激され、動脈壁硬化度が低下する可能性がある。

加速度トレーニングは身体に障害を持った人々でも行うことができる。

したがって、整形外科的疾患、神経学的疾患、外傷のリハビリテーション、老化による筋力低下など、運動療法の有用な補助手段として加速度トレーニングの可能性を探ることは有意義である。

加速度トレーニングが自律神経に及ぼす影響

末梢血流は末梢血管拡張、収縮によっても変化し自律神経と深い関係がある。リラックスすることで末梢血流が増加するが、我々の経験では



図1 脈波を感知する赤外線センサーを耳垂部に取り付け心拍変動データを採取

30Hzの比較的低い周波数でプレート上に立位で膝を少し曲げた状態を保持したり仰臥位で下腿をプレート上に乗せ一定の姿勢を保持することでリラックスできることが確認されている。この状態での加速度トレーニングは筋力増強を目的とするよりも、むしろマッサージ効果やリラクセーション効果を目的として行われている。

加速度トレーニングは、30Hzの周波数で全身もしくは下肢へのエクササイズやストレッチで副交感神経レベルが向上する。一般に自律神経機能測定は、心拍変動解析システムによって行われ、我々は、Biocom社製のHRS(Heart Rhythm Scanner)を使用して耳垂部に赤外線センサーを装着して5分間心拍変動を測定し解析を行っている(図1)。心拍変動解析は、高速フーリエ変換(FTT)を用いて行った。得られたパワースペクトルのうち、0.04~0.15Hzを低周波数領域(LH)、0.15~0.40Hzを高周波数領域(HF)とした。

心拍変動解析とは、心拍数やRR間隔変動(心拍変動)を測定することにより自律神経の影響、さらにそれを変化させる原因となっている精神的な安定度やストレスの程度などを類推することができるものである。RR間隔とは、心電図の波形で一番大きくスパイク状に出るR波と次のR波までの間隔のことである。このRR間隔変動をスペクトル変換したときの高周波成分(>0.15Hz)を「HF」、低周波成分(0.04~0.15Hz)を「LF」と呼び、HF成分は、心臓を支配している自律神経の副交感神経の活動のみを反映するとされている。また、HF成分は通常、呼吸性渦性不整脈に対応

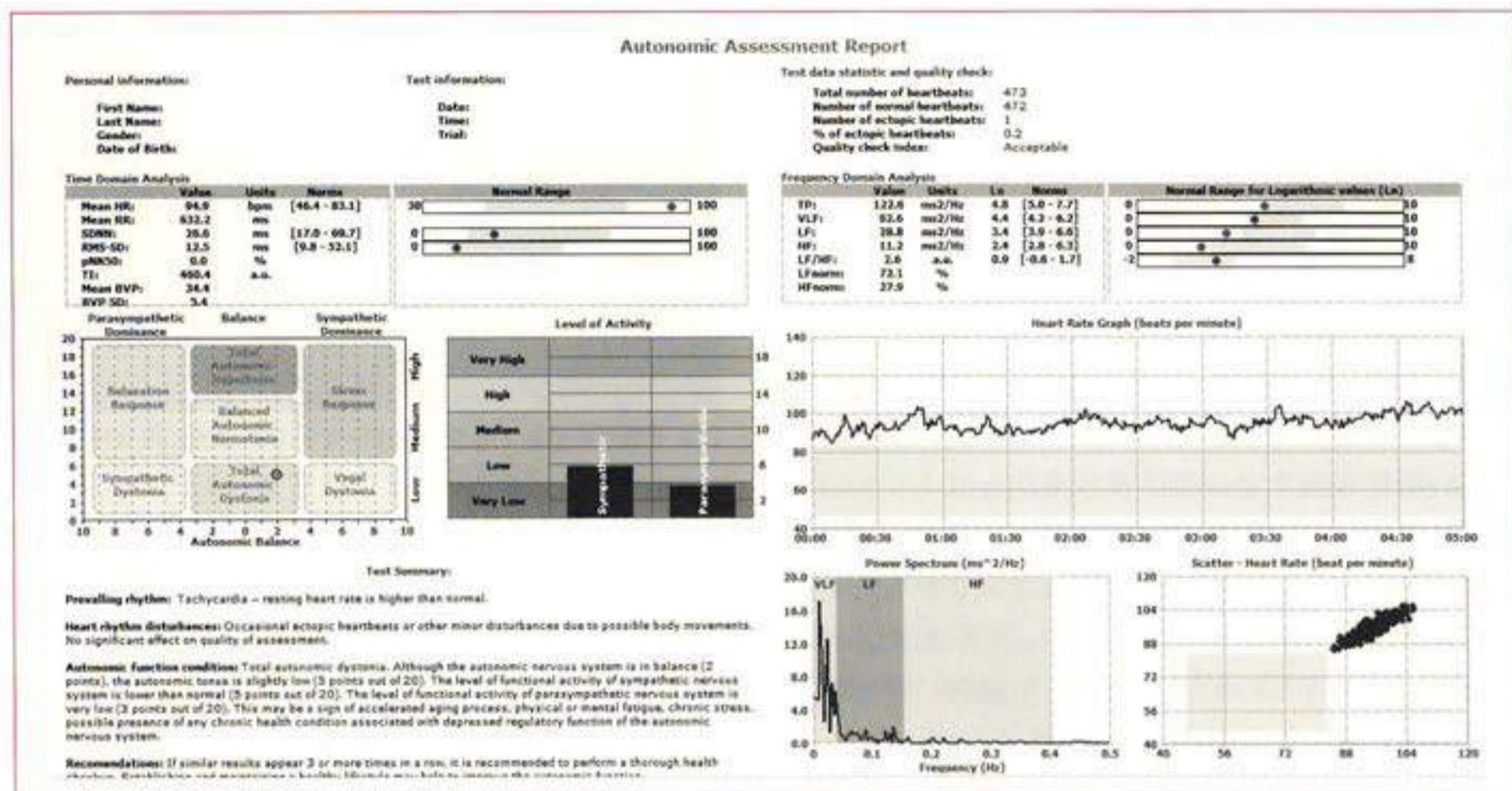


図2 振動前の自律神経機能検査結果

交感神経レベル、副交感神経レベルいずれも低値。

する。したがって、その周波数は呼吸の周波数に等しい。一方、LF成分は、交感神経と副交感神経の両方の活動を反映するとされている。そのため、HF成分とLF成分の比率が、交感神経および副交感神経の活動指標となるとされている²⁴⁾。一般に、LF/HF比を交感神経の活動性の指標とし、HFを副交感神経の活動性の指標とする。周波数領域解析のパラメーターは、FFTにより計算されたパワースペクトルから算出される。自律神経関連の実験では周波数領域分析パラメーターである very low frequency (VLF), high frequency (HF), low frequency (LF), LF/HF比、および total power を測定項目として用いることが多い²⁵⁾。

副交感神経機能低下を日常的に認めた38歳男性へPower Plate®を使用して5分間のマッサージを下腿筋群へ行った前後の自律神経レベルの変化を示す(図2,3)。被験者は仰臥位になり、下腿をPower Plate®のプレート上に乗せて30Hzで1分間×5セット、高振幅(5~6mm)の振動刺激を与えた(図4)。座位になって5分後に計測を行った(図2,3)。HF値の増加による副交感神経レベルの向上が認められる(図5)。事前に行った検査

では、この被験者は、5分間の仰臥位状態では副交感神経レベルの変化は認められなかった。

自律神経は末梢血管拡張、収縮を司る。加速度トレーニングによる振動刺激は、血管への直接的刺激と自律神経による影響の二つが考えられる。加速度トレーニングの運動強度を増加させると筋肉への負荷が増大し交感神経優位になり筋肉内血流が増加すると想定されるが、低強度の刺激である周波数でのマッサージ、およびリラクセーション目的では副交感神経レベルを向上させこれによる末梢血管拡張が期待される。

現在、副交感神経レベルが増大する振動の最適な周波数、振幅、時間、姿位が検討されている。我々の実験では、立位の姿位で周波数を変化させ5分以上緩やかな振動を身体に与えても副交感神経レベルにはほとんど影響ないことが確認されているが、各種パラメーターの加速度トレーニングにおいて血流や自律神経への影響は、単純ではなくプレート上の姿位や荷重のかけ方によっても大きく差が出ると考えられる。また、同じパラメーターの設定でも自律神経に対する影響は個体差が大きく注意を要する。しかし、加速度トレーニングで自律神経へ影響を与えることが可能であ

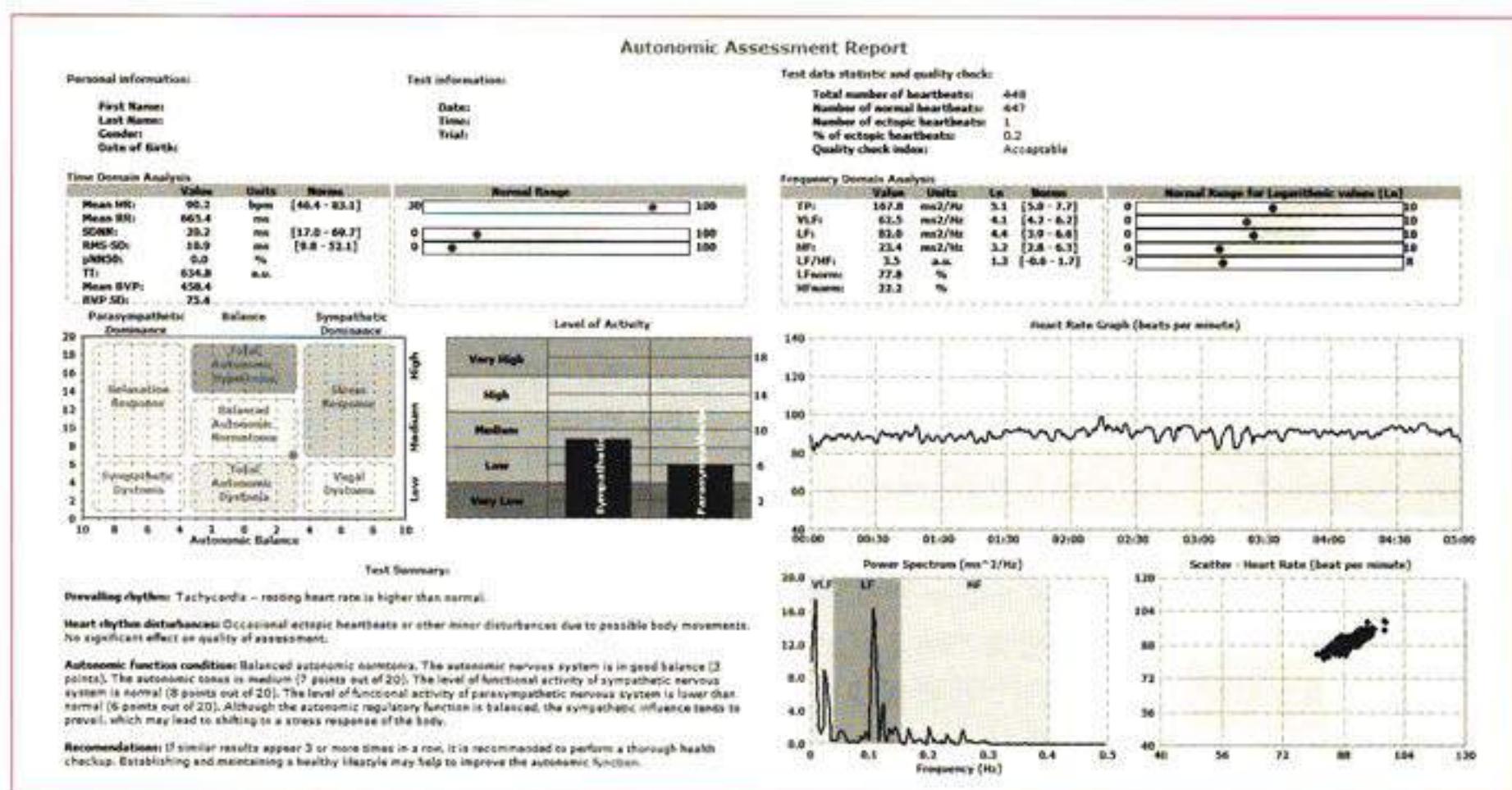


図3 振動後の自律神経機能検査結果

交感神経、副交感神経レベルの増加が認められる。



図4 Power Plate®による下腿へのマッサージ

仰臥位で30Hzの周波数で振動するプレート上に下腿を1分間×5セット乗せリラクセーションを行う。

れば、自律神経に関する疾患へのアプローチの手段としても有用である。

Power Plate®は筋肉量を増大させる筋力トレーニング以外に、マッサージやリラクセーション

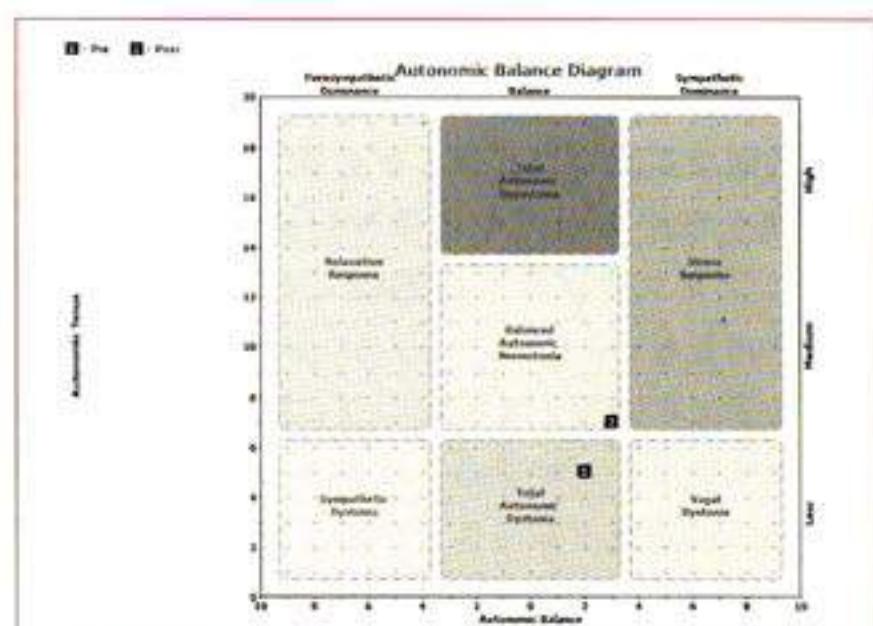


図5 振動前後の自律神経バランスの比較

副交感神経レベルの向上が認められた。

ン効果が期待できる機器としても使用される。従来、鍼灸師、トレーナーなどが徒手でマッサージを運動前後に行っていたが、アスリートの競技前のコンディショニングや運動後のケアにも有用と考えられる。

アスリートにとって競技前の緊張を維持するとともに、過剰にならないよう副交感神経レベルを高めリラックスする状態も重要であることが我々の研究でわかっている²⁶⁾。

アスリートのコンディショニングを行うにあ

たって自律神経の安定、副交感神経レベル向上という視点からも加速度トレーニングは重要であり、今後の研究に期待される。

まとめ

加速度トレーニングにより脊髄固有の経路が刺激されると、主に神経筋系の神経適応が惹起され、筋力が増加すると示唆されている。筋力以外の血流、自律神経に対する影響も同様に起こるが、加速度トレーニングを行う場合、周波数、振幅、時間、姿勢など多くのパラメーターが存在し、トレーニングプログラムが複雑である。また、個々の身体状態を正確に把握し、姿勢保持や体重移動などを安定して行う必要があるため、加速度トレーニングを指導する熟練トレーナーも必要で、負荷の程度でトレーニング効果、マッサージ効果、リラクセーション効果、ストレッチ効果にも大きな差が出る。このため、安定した効果と評価を得るために適切なパラメーターの組み合わせと的確な運動プログラムが必要である。現時点では残念ながら血流や自律神経機能を考えたトレーニングプログラムは熟練したトレーナー同様、存在しない。

国内では加速度トレーニングに関する取り組みや臨床研究はまだ始まったばかりで検討する課題が多い。加速度トレーニングの下肢への皮膚血流増加は実験的にも理論的にも説明されているが、周波数や姿勢、付随するエクササイズによる影響が大きい。

しかし、血流・自律神経への好影響は、加速度トレーニングが競技パフォーマンス向上を目的とした筋力増強や健康増進目的にとどまらず、各疾患の治療目的でも有用であることを示唆する。

文 献

- Delecluse, C. et al.: Strength increase after wholebody vibration compared with resistance training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35 : 1033-1041, 2003.
- Roelants, M. et al.: Whole-body-vibration training increases knee-extension strength and speed of movement in older women. *J. Am. Geriatr. Soc.* 52 : 901-908, 2004.
- Torvinen, S. et al.: Effect of four-month vertical whole body vibration on performance and balance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34 : 1523-1528, 2002.
- Petrofsky, J. S. et al.: The effects of type 2 diabetes and aging on vascular endothelial and autonomic function. *Med. Sci. Monit.* 11 : CR247-254, 2005.
- Watkins, P. J.: The diabetic foot. *BMJ* 326 : 977-979, 2003.
- Berne, R. M. et al.: *Principles of Physiology*, 3rd ed., Mosby, 256-264, 1999.
- Rhoades, R. et al.: *Human Physiology*, 3rd ed., Saunders College Publishing, 588, 1996.
- Thomas, G.D. et al.: Neural control of muscle blood flow during exercise. *J. Appl. Physiol.* 97 : 731-738, 2004.
- Tschakovsky, M. E. et al.: Is sympathetic neural vasoconstriction blunted in the vascular bed of exercising human muscle? *J. Physiol.* 541(Pt 2) : 623-635, 2002.
- Kerschan-Schindl, K. et al.: Whole body vibration exercise leads to alterations in muscle blood volume. *Clin. Physiol.* 21 : 377-382, 2001.
- Noel, B.: Pathophysiology and classification of the vibration white finger. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 73 : 150-155, 2000.
- Stoyneva, Z. et al.: Current pathophysiological views on vibration-induced Raynaud's phenomenon. *Cardiovasc. Res.* 57 : 615-624, 2003.
- Lundstrom, R. et al.: Vibrations in hand held tools. The Swedish National Board of Occupational Safety and Health. *Invest. Rep.* 84 : 1-111, 1984.
- Warburton, D. E. et al.: Prescribing exercise as preventive therapy. *CMAJ* 174 : 961-974, 2006.
- Duncan, G. E. et al.: Prescribing exercise at varied levels of intensity and frequency: A randomized trial. *Arch. Intern. Med.* 165 : 2362-2369, 2005.
- Goto, C. et al.: Effect of different intensities of exercise on endothelium-dependent vasodilation in humans: Role of endothelium-dependent nitric oxide and oxidative stress. *Circulation* 108 : 530-535, 2003.
- Kemmler, W. et al.: Benefits of 2 years of intense exercise on bone density, physical fitness, and blood lipids in early postmenopausal os-

- teopenic women. *Arch. Intern. Med.* 164 : 1084-1091, 2004.
- 18) Philbin, R. : Weight training and diabetes. *Diabetes Health* 36-39, 2005.
- 19) Bell, H. J. et al. : The respiratory effects of two modes of passive exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88 : 544-552, 2003.
- 20) Figoni, S. F. et al. : Physiologic responses of paraplegics and quadriplegics to passive and active leg cycle ergometry. *J. Am. Paraplegia. Soc.* 13 : 33-39, 1990.
- 21) Nash, M. S. et al. : Effects of electrically-stimulated exercise and passive motion on echocardiographically-derived wall motion and cardiodynamic function in tetraplegic persons. *Paraplegia* 33 : 80-89, 1995.
- 22) Hinds, T. et al. : Effects of massage on limb and skin blood flow after quadriceps exercise. *Med. Sci. Sport Exerc.* 36 : 1308-1313, 2004.
- 23) Sackner, M. A. et al. : Nitric oxide is released into circulation with whole-body, periodic acceleration. *Chest* 127 : 30-39, 2004.
- 24) Mizuno, Y. et al. : Simulated analysis of method to calculate HF power spectral density function of heart rate variability Japanese of medical electronics and biological engineering. *JJME* 35 : 288-296, 1997.
- 25) Perini, R. et al. : Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 90 : 317-325, 2003.
- 26) Suetake, N. et al. : Evaluation of autonomic nervous system by heart rate variability and differential count of leukocytes in athletes. *Health* 2 : 1191-1198, 2010.