

運動単位の閾値にサーカディアンリズムは存在するか？

吉備国際大学 山口英峰
(共同研究者) 川崎医療福祉大学大学院 高原皓全
流通科学大学 関和俊
川崎医療福祉大学 小野寺昇
吉備国際大学 永見邦篤

Does the Circadian Rhythm Present in The Recruitment Threshold of Motor Unit?

by

Hidetaka Yamaguchi, Kuniatsu Nagami

*Department of Health Welfare and Human Performance,
School of Social Welfare, KIBI International University*

Terumasa Takahara

Doctoral Program in Health Science, Kawasaki University of Medical Welfare

Kazutoshi Seki

University of marketing and distribution sciences,

Faculty of service industries, Department of hospital and welfare service

Sho Onodera

Department of Health and Sports Sciences, Kawasaki University of Medical Welfare

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the relationship between rectal temperature and loop time estimated by the Hoffmann reflex (H-reflex) on daily rhythms in human, and to investigate whether the circadian rhythm is present in the recruitment threshold of motor unit. Six healthy males were voluntarily participated in this study. H-reflex was evoked in

the right soleus muscle, and rectal temperature was recorded at 7:00, 11:00, 16:00, 20:00, 22:00 and 7:00 h through the two days. We compared the time interval between the times on positive peak of M and H wave (loop time), which indicates the recruitment threshold of motor units. The rectal temperature significantly changed during 24 hours ($p < 0.05$); natural circadian rhythms were seen in all subjects. The rectal temperature was significantly lower in the morning and midnight compared to the daytime ($p < 0.05$) through the two days. In contrast, the loop time was significantly shorter in the daytime than in the morning and midnight ($p < 0.05$) through the two days. The patterns of temperature and loop time showed in a mirror image. The significant negative correlations were found between the loop time and the rectal temperature ($r = 0.77$, $p < 0.05$). These results suggest the circadian rhythm is present in the recruitment threshold of motor unit.

要 旨

本研究の目的は、日内変動における直腸温と脊椎の興奮性の指標であるH反射を用い、H波とM波のpositive peakの時間間隔から評価したloop timeとの関係性について明らかにし、運動単位の動員閾値がサーカディアンリズムの指標になり得るかどうか検討することである。被験者は健康な成人男性6名とした。測定は、実験一日目および二日目の7時、11時、16時、20時、22時、三日目は7時に測定を行った。測定項目は電気刺激によるヒラメ筋のH反射および直腸温とした。本研究では、H波とM波のpositive peakの時間間隔(loop time)から運動単位の動員閾値を評価した。Loop timeは、運動単位の動員閾値の指標とした。直腸温は二日間ともに7時を基点に日中有意に上昇した。反対にloop timeは二日間ともに7時を基点に日中有意に減少した。二日間におけるloop timeの変動は、サーカディアンリズムの指標である直腸温とミラーイメージの関係を示したことから、運動単位の動員閾値にサーカディアンリズムが存在する可能性が示唆された。

緒 言

早朝の激しい運動が危険であることは、循環系の観点からすでに明らかになっている^{16, 19}。ヒトは、昼間に交感神経系活動が亢進し、夜間に副交感神経系活動が亢進する^{3, 17}。早朝の時間帯に激しい運動を行うことは、副交感神経系活動が亢進している状態での身体活動を示し、このことが早朝の激しい運動の危険性を示唆する。それにも関わらず、激しい早朝のトレーニングが運動パフォーマンスや体力向上に有効であるとの考え方が根強いように思われる。

生体には体内時計が存在する。これまで、ヒトおよび動物の日内変動についてはホルモン分泌、体温や運動パフォーマンスなどに関する研究成果が報告されてきた^{1, 8, 18}。ヒトの運動パフォーマンスについてみると、最大酸素摂取量、筋力や反応時間などは、一日の中で夕方に高い値を示すことが報告されている^{2, 20}。Chen⁵やWolpaw²¹は、ラットやサルにおいて脊髄の興奮性に日内変動が存在することを明らかにしている。一方、ヒトにおいて朝と夕方の脊髄の興奮性についての報告⁹があるものの、脊髄の興奮性の日内変動を模索した報告は極めて少ない^{10, 22}。

山口ら²²⁾は、電気刺激を用い反射弓の経路で興奮が伝わり筋電図波形として生じたH波と刺激が興奮となり直接筋電図波形として生じたM波のpositive peakの時間間隔(loop time)から運動単位の動員閾値を評価し、日内変動におけるloop timeと直腸温の変動がミラーイメージを示すことを明らかにした。サーカディアンリズムの指標の一つである直腸温とloop timeがミラーイメージを示すことから、運動単位の動員閾値にサーカディアンリズムが存在する可能性を示唆している。一方で、24時間の変動ではなく、2日以上連続的な変動を把握することにより、より詳細な知見が得られると考察している。従って、48時間の変動を観察することにより、運動単位の動員閾値がサーカディアンリズムを持つかどうか確認することが可能であると考え。

本研究は、日内変動における直腸温とH反射から評価したloop timeとの関係性について明らかにし、運動単位の動員閾値がサーカディアンリズムの指標になり得るかどうか検討することを目的とした。

1. 方法

1.1 被験者

被験者は健康な成人男性6名とした。身体特性は、年齢 22.1 ± 1.2 歳(平均値 \pm 標準偏差)、身長 174.0 ± 4.4 cm、体重 65.2 ± 2.8 kgであった。被験者は非喫煙者とした。

被験者には、ヘルシンキ宣言の趣旨に従い、研究の目的、方法、期待される効果、不利益がないこと、個人情報保護について説明を行い、研究参加の同意を得た。

1.2 測定条件

測定は吉備国際大学の実験室で行った(室内温度: 24.2 ± 0.3 度)。測定は、実験一日目および二日目の7時、11時、16時、20時、22時、三日目

は7時に測定を行った。被験者は前泊し、23時から翌日の7時までの8時間を睡眠時間とした。7時の測定では被験者が起床後に測定した。測定は直腸温、電気刺激の順に行った。電気刺激における筋電図電極は、各時間毎に交換し、電極位置が変わらないように注意した。また、刺激強度を決定するために各時間で最大M波を測定した。H反射は体動や睡眠に影響を受けることから、被験者には測定中に体動しないこと、睡眠しないことを指示した。刺激位置が変わらないようにバンドで固定し、M波の潜時が変わらないように対処した。歩数計(Intelligent Calorie Counter, (株)アイ・ティ・リサーチ製, 仙台)を装着し、歩数を測定した。被験者に同一の食事を3回(朝食:8時、昼食:12時、夕食:18時)と、飲料水としてお茶(500ml \times 2本)を摂取させた。測定以外の時間は、実験室で読書や座業をするよう指示した。被験者には、実験前一週間は23時には就寝すること、激しい運動をさけることを指示した。

1.3 測定項目

測定項目は電気刺激によるH反射および直腸温とした。被験者には伏臥位姿勢で十分な安静を保たせ、各時間帯のH反射を測定した。表面電極法(5mm ϕ , 白金皿電極)を用い、双極誘導にて右足のヒラメ筋と前脛骨筋の筋電位を2ch生体電気用前置増幅器(JB-210J, 日本光電, 東京)によって誘導し、記録した。電極間距離は20mmとした。電極間抵抗は全ての時間帯において5k Ω 以下であった。ヒラメ筋のH波およびM波を誘発するため、膝窩部の脛骨神経に電気刺激を行った。拮抗筋活動にともなう相反性抑制が生じないことを確認するために、前脛骨筋の筋活動をモニタリングしながら測定を行った。H反射は電気刺激装置(SEN-3301, 日本光電)を用いて、パルス幅1msの矩形波を発生させ、アイソレーター(SS-202J, 日本光電)を介して、4秒に1回の間隔で計

10~20回経皮的に電気刺激によって誘発した。刺激強度は最大M波の10%とした。各時間帯における刺激の定常性を確保するために、M波をモニターで確認しながらM波の大きさを調節した¹²⁾。信号は、10kHzでA/D変換 (PowerLab/800, AD instruments, Australia) した後、パーソナルコンピュータに取り込み、解析した。直腸温は感熱部直腸温計 (YSI4000サーモメーター、日機装ワイエスアイ) を用いて記録した。

1. 4 解析方法

H波の解析は、M波の振幅が一定した4~10回の波形を加算平均し、M波およびH波の振幅と潜時を評価した。各時間帯のM波およびH波振幅は、刺激強度設定時に用いた最大M波を100%とし、正規化した値で求めた。本研究では、解析方法としてH波のpositive peakの時間からM波のpositive peakの時間を差し引いた値 (loop time) を用いた^{14, 22)}。日内変動によるloop timeの変化は、同じ刺激量に対して興奮する運動単位が変化することを示している。本研究は、loop timeを脊髄前角細胞の閾値、つまり運動単位の動員閾値の指標として用いた²²⁾。M波およびH波潜時は足の長さに依存することから、loop timeは絶対値と7時の測定値に対する変化量で評価した。また、二日目7時の値は一日目7時の値に対する変化量、三日目7時の値は二日目7時の値に対する変化量とした。

1. 5 統計処理

各測定値は平均値±標準偏差で示した。一日目と二日目における48時間の各パラメータの変動について統計処理を行った。日内変動と各パラメータとの関係は、反復測定分散分析 (repeated measured ANOVA) を行った。有意変動が確認された場合、Student-Newen-Keuls法で後検定を行った。直腸温とloop timeとの関係は単相関と単

回帰分析で検定した。危険率 (p) 5%未満を有意とした。

2. 結果

直腸温の日内変動を図1に示した。直腸温は有意な変動を示し、一日目および二日目ともに7時を基点に日中有意に上昇した。一日目と二日目の直腸温の変動に差はみられなかった。

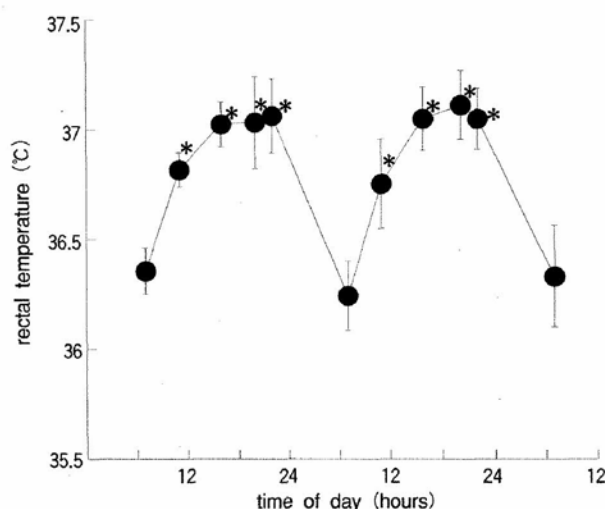


図1 直腸温の日内変動

* 7時に対する有意差を示す (p<0.05)

日内変動におけるloop timeの絶対値 (a) と7時に対するloop time (b) の変化量を図2に示した。二日目7時の値は一日目7時の変化量、三日目7時の値は二日目7時の変化量とした。loop timeは有意な変動を示し、7時を基点に日中有意に減少した。一日目と二日目のloop timeの変動に差はみられなかった。Loop timeの日内変動は、直腸温の変動とミラーイメージの変動を示した。そこで、日内変動におけるloop timeと直腸温の関係について検討した (図3)。loop timeと直腸温は、7時に対する変化量で示した。直腸温とloop timeの間には、有意な負の相関関係 (r=0.77) が観察された。

H波およびM波振幅の日内変動を図4に示した。M波振幅に有意な変動は認められなかった。M波振幅の平均は9.9±0.3%であった。H波振幅

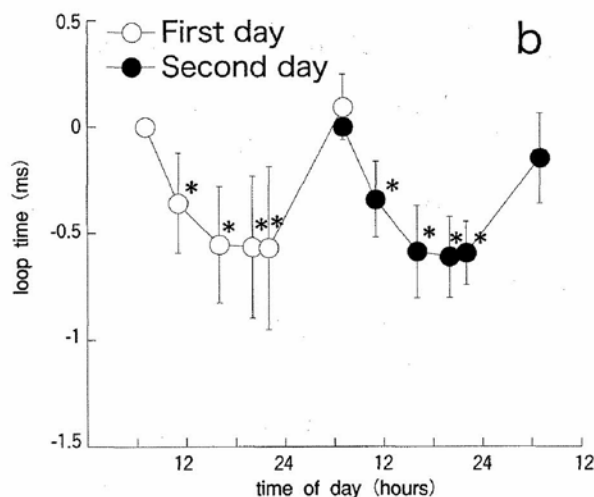
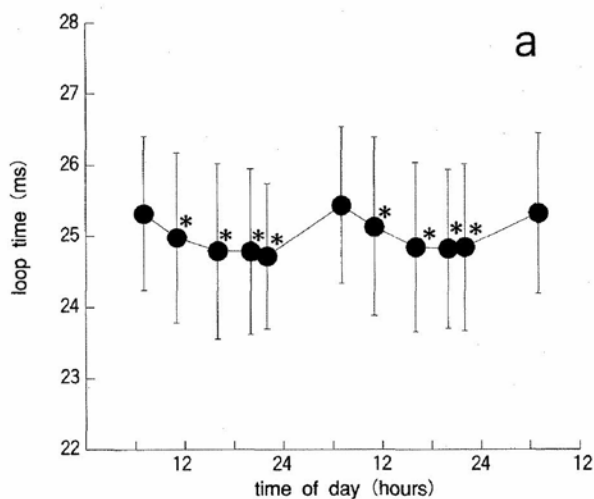


図2 loop time の日内変動
 * 7時に対する有意差を示す ($p < 0.05$)
 a : 絶対値
 b : 7時に対する変化量
 二日目7時のloop time : 一日目7時に対する変化量
 三日目7時のloop time : 二日目7時に対する変化量

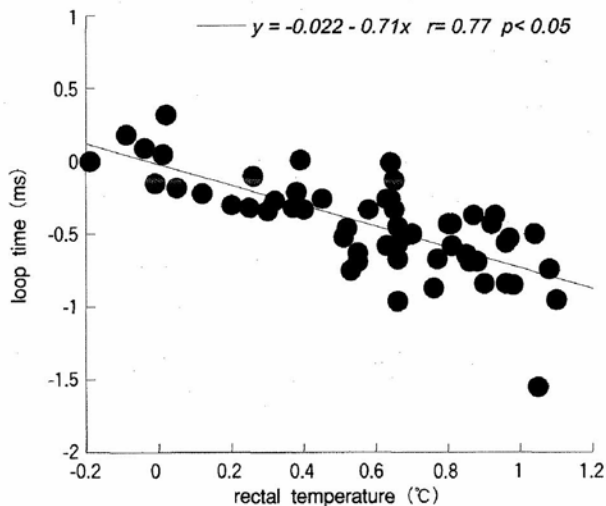


図3 日内変動におけるloop timeと直腸温の関係
 loop timeおよび直腸温の値は7時に対する変化量で示した

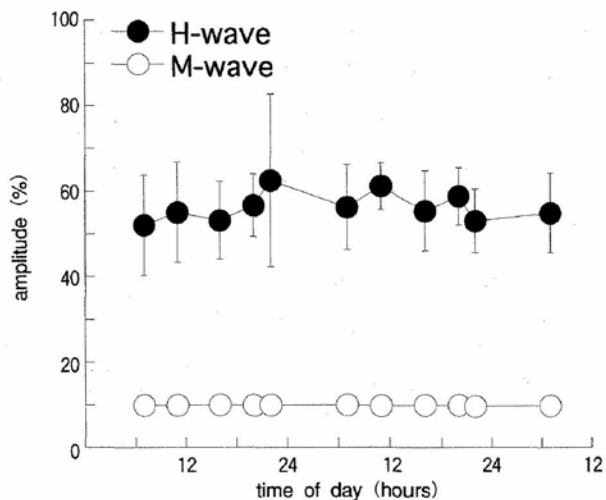


図4 M波およびH波振幅の日内変動
 各時間帯のM波およびH波振幅は、刺激強度設定時に用いた最大M波を100%とし、正規化した相対値で評価した

においても有意な変動はみられなかった。H波振幅について個別にみてみると、日中に高い値を示す被験者、一日中変化がない被験者、日中に低値を示す被験者が観察され、H波振幅には個人差が認められた。

一日目の歩数は 217 ± 23 歩、二日目の歩数は 213 ± 35 歩であった。一日目と二日目の歩数に有意な差はみられなかった。

3. 考察

本研究は、安静時のH反射に影響を及ぼすと考えられる生活活動強度を統制した。一日目および二日目における実験時の歩数は、それぞれ 217 ± 23 歩と 213 ± 35 歩であった。このことから二日間で得られた各パラメータに身体活動量が及ぼす影響はほとんどないと考えられる。体温の日内変動は、サーカディアンリズムの変動パターンの安定性を示す指標と考えられている³⁾。一日目および二日目の直腸温は、先行研究^{3, 11, 22)}と同様の変動を示した。このことは、本研究に参加した被験者はいわゆる日内変動を有する対象者であったことを示している。

3. 1 運動単位の動員閾値の日内変動について

Loop time は、脊髄前角細胞の閾値、つまり運動単位の動員閾値の指標であると考えられている^{14, 22)}。二日間における loop time の変動は、直腸温とミラーイメージの関係を示した。本研究の結果は、一日の loop time の変動を観察した山口らの報告²²⁾ を支持する結果であり、二日間の連続したこの測定結果は新しい知見である。サーカディアンリズムの指標である直腸温と loop time の間に有意な負の相関関係が観察されたことから、運動単位の動員閾値にサーカディアンリズムが存在する可能性が示唆された。潜時は神経伝導速度の指標を反映していることから、この要因として神経伝導速度の関与が考えられる。これまで、温熱刺激や寒冷刺激によって H 波潜時が異なることが報告されている⁶⁾。神経伝導速度の変化は一過性の応答で、かつ体温上昇が著しい場合に变化すると考えられる。本研究の日内変動における直腸温の最大値と最小値の差は約 0.9 度であることから、神経伝導速度が、本研究結果の直腸温と loop time の変動がミラーイメージを示すことの主要因ではないと考える。関ら¹⁵⁾ は、ハンドエルゴメーターを用い、運動終了後の loop time の経時的変化を観察し、回復直後に loop time は有意に短くなり、その後時間経過に伴い、安静時の値に戻ることを報告した。また、副交感神経系の亢進過程が loop time の短縮過程と相似な変化を示したことから、体温増加に伴う心臓副交感神経系調節の抑制が運動単位の動員閾値に変化を及ぼし、運動終了後の loop time の短縮に寄与していると考察している。これらのことから、体温変化がトリガーとなり、自律神経系を調整し、運動単位の動員閾値を変化させたと推測される。Chen ら⁴⁾ は、皮質脊髄路を損傷させたラットは、通常のラットと比較し、サーカディアンリズムが短縮することを報告した。このことは、H 反射のサーカディアンリズムは、脳からの下行性の情報に依存してお

り、脳の中でも皮質脊髄路によってコントロールされていることを示唆している。また、サルを用いた皮質体性感覚や H 反射の結果から、サーカディアンリズムは複雑な中枢メカニズムが関与していることも報告されている⁷⁾。これらのことから、H 反射のサーカディアンリズムに関わる上位中枢と運動単位の閾値との関連性の検証が今後の課題であると考えられる。

3. 2 早朝の運動単位の動員閾値について

日中の loop time は、測定した二日とも早朝と比較して有意に短縮した。日中に loop time が短いことは、運動単位の動員閾値が高くなることにより、より速い運動単位が動員されることを示唆する。このことから、夕方に筋力や反応時間などの運動パフォーマンスが高くなる要因の一つとして、loop time が寄与している可能性が推測された。

ヒトは、昼間に交感神経系活動が亢進し、夜間に副交感神経系活動が亢進する^{3, 17)}。一方、夜行性であるラットやマウスはヒトやサルとは反対の応答を示す。夜行性であるラットは昼間に H 反射が亢進し⁵⁾、明るい時間帯に活動するサルは、夜間に H 反射が亢進することが報告されている²¹⁾。これらの知見は、身体活動量が少なく副交感神経活動が亢進している時間帯に脊髄の興奮性が高まり、反対に身体活動量が多い時間帯には脊髄の興奮性が抑制されることを示唆している。早朝の loop time は、測定した二日とも日中と比較して高い値を示した。早朝に loop time 測定が高い値を示したことは、運動単位の動員閾値が低くなることにより、遅い運動単位が動員されたものと考えられる。しかしながら、午前 6 時から正午の時間帯は他の時間帯に比べて、心筋梗塞、脳梗塞や狭心症などを誘発する心臓・脳血管系の異常が多くみられる¹³⁾。特に、起床後 3 時間以内にそれらの発症率が高くなっていることから、起床に伴う昇圧と心拍数増加がリスクとなっている可能性が指

摘されている^{16, 19)}。従って、早朝の運動はウォーキングやランニング等の軽運動を行うことによって1日の生体応答を調整することが望ましいと考えられる。本研究の成果は、中高生の朝練および中高齢者の健康づくりのための運動に対する、早朝の激しいトレーニングの危険性を支持する基礎的な所見であると考えられる。

3. 3 脊髄の興奮性の日内変動

H波振幅は脊髄の興奮性の指標である。Lagerquistら¹⁰⁾や山口ら²²⁾は、早朝と比較し、夕方から夜にかけてヒラメ筋のH波振幅が亢進することを報告している。一方、Guetteら⁹⁾はH波振幅から早朝と夕方では脊髄の興奮性に差がないことを報告していることから、時間帯とヒトの脊髄の興奮性について一致した見解はない。本研究ではH波振幅に有意な日内変動は認められなかったが、日中H波振幅が亢進する被験者や一日を通してほとんど変化しない被験者がみられた。このことは、脊髄の興奮性の日内変動には個人差があることを示している。この要因についても不明であるが、実験前日の身体活動量の違いや睡眠時間等の要素が関与しているものと考えられる。また、先行研究との相違の要因の一つとして、方法的違いも考えられる。本研究では、Mmaxの10%の刺激強度時のH波振幅を評価しているが、Lagerquistら¹⁰⁾はリクルートメントカーブからMmaxの5%刺激強度時のH波振幅を評価している。これらのことから、脊髄の興奮性の日内変動については方法論を含め、更なる検討が必要である。

4. まとめ

本研究は、日内変動における直腸温とH反射から評価したloop timeとの関係性について検討した。二日間におけるloop timeの変動は、直腸温とミラーイメージの関係を示した。本研究の結果

は、一日のloop timeの変動を観察した山口らの報告を支持する結果であり、二日間の連続した測定結果は新しい知見である。サーカディアンリズムの指標である直腸温とloop timeの間に有意な負の相関関係が観察されたことから、運動単位の動員閾値にサーカディアンリズムが存在する可能性が示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。また、本研究の遂行にご協力頂きました吉備国際大学健康スポーツ福祉学科の学生の皆様に感謝いたします。

文 献

- 1) Atkinson G., Edwards B., Reilly T., Waterhouse J.: Exercise as a synchroniser of human circadian rhythms: an update and discussion of the methodological problems., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 99: 331-341 (2007)
- 2) Atkinson G., Reilly T.: Circadian variation in sports performance., *Sports Med.*, 21: 292-312 (1996)
- 3) 白優寛, 山崎健, 西村正広, 小野寺昇: 心電図記録における調節呼吸が心臓自律神経日内変動に及ぼす影響. *宇宙航空環境医学*, 43: 19-25 (2006)
- 4) Chen X.Y., Chen L., Wolpaw J.R., Jakeman L.B.: Corticospinal tract transection reduces H-reflex circadian rhythm in rats., *Brain Res.*, 942: 101-108 (2002)
- 5) Chen X.Y., Wolpaw J.R.: Circadian rhythm in rat H-reflex., *Brain Res.*, 648: 167-170 (1994)
- 6) Dewhurst S., Riches P.E., Nimmo M.A., De Vito G.: Temperature dependence of soleus H-reflex and M wave in young and older women., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 94: 491-499 (2005)
- 7) Dowman R., Wolpaw J.R.: Diurnal rhythms in primate spinal reflexes and accompanying cortical somatosensory evoked potentials., *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 72: 69-80 (1989)

- 8) Drust B., Waterhouse J., Atkinson G., Edwards B., Reilly T.: Circadian rhythms in sports performance--an update., *Chronobiol. Int.*, 22: 21-44 (2005)
- 9) Guette M., Gondin J., Martin A.: Morning to evening changes in the electrical and mechanical properties of human soleus motor units activated by H reflex and M wave., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 95: 377-381 (2005)
- 10) Lagerquist O., Zehr E.P., Baldwin E.R., Klakowicz P.M., Collins D.F.: Diurnal changes in the amplitude of the Hoffmann reflex in the human soleus but not in the flexor carpi radialis muscle., *Exp. Brain Res.*, 170: 1-6 (2006)
- 11) Mills J.N., Minors D.S., Waterhouse J.M.: Adaptation to abrupt time shifts of the oscillator controlling human circadian rhythms., *J. Physiol.*, 285: 455-470 (1978)
- 12) Motl R.W., Dishman R.K.: Acute leg-cycling exercise attenuates the H-reflex recorded in soleus but not flexor carpi radialis., *Muscle Nerve.*, 28: 609-614 (2003)
- 13) Muller J.E., Tofler G.H., Stone P.H.: Circadian variation and triggers of onset of acute cardiovascular disease., *Circulation*, 79: 733-743 (1989)
- 14) Seki K., Yamaguchi H., Onodera S.: Responses of the latent time of H wave in human gastrocnemius muscle to arm crank exercise., *Jpn. J. Aerosp. Environ. Med.*, 45: 99-104 (2008)
- 15) 関和俊, 高原皓全, 山口英峰, 小野寺昇: ハンドエルゴメーター運動後のヒラメ筋H波の潜時および振幅の変動. 体力科学, 57: 635 (2008)
- 16) Shimada K., Kario K., Umeda Y., Hoshide S., Hoshide Y., Eguchi K.: Early morning surge in blood pressure., *Blood Press Monit.*, 6: 349-353 (2001)
- 17) Vandewalle G., Middleton B., Rajaratnam S.M., Stone B.M., Thorleifsdottir B., Arendt J., Dijk D.J.: Robust circadian rhythm in heart rate and its variability: influence of exogenous melatonin and photoperiod., *J. Sleep Res.*, 16: 148-155 (2007)
- 18) Weinert D., Waterhouse J.: The circadian rhythm of core temperature: effects of physical activity and aging., *Physiol. Behav.*, 90: 246-256 (2007)
- 19) White W.B.: Ambulatory blood pressure monitoring: dippers compared with non-dippers., *Blood Press Monit.*, 5: 17-23 (2000)
- 20) Winget C.M., DeRoshia C.W., Holley D.C.: Circadian rhythms and athletic performance., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17: 498-516 (1985)
- 21) Wolpaw J.R., Seegal R.F.: Diurnal rhythm in the spinal stretch reflex., *Brain Res.*, 244: 365-369 (1982)
- 22) 山口英峰, 関和俊, 高原皓全, 小野寺昇, 永見邦篤: 日内変動における心臓自律神経系活動と反射機能との関係. 健康医科学研究助成論文集. 24: 134-143 (2009)