モータ制御の駆動による下腿三頭筋に対する 静的ストレッチングのリラクセーション効果 (第1報)

——ストレッチング後の主観的気持ち良さと自律神経機能——

*Effects of Static Stretching of the Triceps Surae Muscle Driven by
Motor Control on Relaxation: Subjective Comfort and
Autonomic Nervous Function after Static Stretching*

酒井 吉仁^{1,2)} 梅野 克身¹⁾ 荻島 久裕¹⁾ 辻 政彦¹⁾ 上條 正義²⁾

YOSHIHITO SAKAI^{1,2)}, KATSUMI UMEMO¹⁾, HISAHIRO OGISHIMA¹⁾, MASAHICO TSUJI¹⁾, MASAYOSHI KAMIJO²⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Toyama Medical and Human Services Institute: 149-9 Yanagihara, Namerikawa-shi, Toyama 936-0023, Japan. TEL+81 76-476-0001 E-mail: sakai@tif.ac.jp

²⁾ Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

Rigakuryoho Kagaku 29(3): 383–387, 2014. Submitted Nov. 12, 2013. Accepted Dec. 24, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to elucidate the effects of static stretching of human skeletal muscles on relaxation. [Subjects] Ten healthy, adult subjects were the subjects. [Method] A motor controller was used to drive the ankle joint to stretch the triceps surae muscle at a constant angular velocity (15°/sec). Electrocardiograph (ECG), instantaneous respiratory flow (ILV), blood pressure, ankle angle and plantar pressure were monitored continuously during prestretching (PreST), stretching (ST) and poststretching (PostST) for 10-minutes each. We performed power spectral analysis of the heart rate variability (HRV) calculated by fast Fourier transformation (FFT). [Results] Enhancement of HF, attenuation of LF/HF and decrease of the respiratory cycle were shown at the end of PostST, suggesting an increase of parasympathetic outflow and attenuation of sympathetic outflow. However, the evaluation of good feeling was higher at just after ST (30–60 seconds). [Conclusion] Static stretching of the triceps surae muscle induces psychological relaxation.

Key words: static stretch, heart rate variability, relaxation

要旨:〔目的〕ヒトの骨格筋に対する静的ストレッチングにおけるリラクセーションの効果について検討した。〔対象〕健康成人男性10名を用いた。〔方法〕足関節の背屈運動を等速性筋力評価訓練装置で制御し、下腿三頭筋の伸張を行い、ストレッチング前、ストレッチング中、ストレッチング後の心拍変動スペクトル解析を行った。〔結果〕ストレッチング後で心拍変動高周波数帯域成分 (high frequency component: HF) の増加と心拍変動低周波数帯域成分 (low frequency component: LF) / HF の減衰、呼吸周期の低下を有意に認め、副交感神経活動の亢進と交感神経活動の減衰の効果が明らかとなった。評価により、ストレッチング開始直後に被験者に気持ち良さが得られたことが明らかとなった。〔結語〕下腿三頭筋への静的ストレッチングがリラクセーションを誘発することが示唆された。

キーワード: 静的ストレッチング, 心拍変動, リラクセーション

¹⁾ 富山医療福祉専門学校 理学療法学科: 富山県滑川市柳原 149-9 (〒936-0023) TEL 076-476-0001

²⁾ 信州大学 大学院総合工学系研究科

I. はじめに

静的ストレッチング (static stretching: 以下, ST) は健康の維持および増進のために一般の老若男女の間や競技スポーツ, 医療の各幅広い分野で応用され, 実践されているのは周知の事実である。STは1975年にAnderson¹⁾により提唱され, 現在までに経験的に体系化されてきた。Andersonの著書の序文で, “ストレッチングは穏やかな気持ちでリラックスできる”, さらに“なぜストレッチングを行うのか”の冒頭でストレッチングは気持ちをリラックスさせ身体の調子を整えてくれると, そのリラクゼーションの効果を強く説いている。我々が実際に患者や学生達へストレッチングをした後, リラックスできる, あるいは気持ちが良かったという声をよく聞くことがある。伊藤ら²⁾はSTが計算負荷テスト後のリラクゼーションに役立つことを示唆している。また, 最近の臨床的研究では中程度の高血圧患者に対するSTが収縮期と弛緩期の血圧の降下をもたらす³⁾。妊娠高血圧症の予防において, 心拍変動の解析からSTが交感神経活動の抑制と副交感神経活動の亢進をもたらすことが報告されている⁴⁾。さらに, 睡眠前の軽いストレッチングが副交感神経活動を亢進させ⁵⁾、入眠を含めた睡眠の質を改善すること⁶⁻⁸⁾が報告されている。しかし, 健康人を対象としたSTのリラクゼーションの効果に関する基礎的研究は少ない⁹⁻¹²⁾。いずれの研究もストレッチング後のリラクゼーション効果として, 副交感神経活動の亢進と交感神経活動の減衰が示唆されている。

本研究は健康成人男性を対象に, 受動的STの主観的リラクゼーション感への効果を明らかにするために, 足関節の背屈運動をモータ駆動で制御し, 下腿三頭筋のST前後で心電図を導出し, 心拍変動スペクトラム解析から自律神経活動を求めること¹³⁻¹⁹⁾により, 静的ストレッチングの効果を検証した。

II. 対象と方法

1. 対象

本研究では, 健康成人男子10名を被験者とした。年齢, 身長, 体重の平均±標準偏差は, それぞれ 22.1 ± 2.1 歳, 171.2 ± 5.3 cm, 64.8 ± 9.2 kgであった。本研究は信州大学のヒトを対象とした研究に関する倫理委員会を審査を受け, 承認された上で実施した (承認番号第24番)。実験前に個人情報の保護および実験の目的と手順等について被験者に口頭および文面で丁寧に説明し, 承諾書に署名捺印を得て, 実験を実施した。特に被験者の実験に対する心理的不安感をなくすため, 実験直前に実験手順に沿って簡単な実験のリハーサルを実施した。なお, 被験者には実験の前日に強い精神的身体的ストレスを負わないこと, 睡眠を十分取ることを指示した。また, 実験

前2時間の食事, アルコール, カフェインを摂取しないよう指示した。

2. 方法

本実験は, 室温 $26 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$, 湿度30~50% RHに設定した実験実習室の環境で, 2008年5月から9月の期間中に実施された。室内の明るさを一定にするために, 窓からの採光は遮光カーテンで遮断し, 室内の照明を一定にした。また, 検者による指示以外の室内外の不必要な音は遮断, 統制した。実験開始の時間は13時に設定した。本研究のストレッチングの課題プロトコル, および主要な実験データの記録方法およびオフラインの解析方法を図1に示す。ストレッチング前の安静 (以下, pre-ST) は10分, ストレッチング (以下, ST中) は10分, ストレッチング終了後の安静 (以下, post-ST) は10分とした。また, pre-STの測定を行う前に, さらに10~20分間の安静を仰臥位で行い, 身体の生理的定常状態とした。

ストレッチングによる主観的リラクゼーション感と交感神経活動, 副交感神経活動について, pre-ST, ST中, post-STの測定値を比較することにより検討した。主観的ストレッチング感は, 筋の伸張による気持ち良さと痛みを11段階のnumerical rating scale (0: 何も感じない~10: 非常に気持ちが良い, 激しい痛み) により被験者から聴取する方法で評価した。ストレッチング感は, ストレッチング開始後の足関節背屈 20° に到達した時点, およびストレッチング終了直前の値, およびストレッチング終了直後, および終了後10分経過する直前の値とした。そして, ST中, およびpost-STの各2つの値の平均値を採用した。交感神経活動, 副交感神経活動は, 心電図の心拍数, および心拍変動解析により検討した。

実験についての説明とリハーサルを行った後, 被験者に心電図の電極を右第II肋間間隙 (胸骨側) と左第V肋間間隙で中腋窩線上の2カ所に, 不関電極を腹部に貼付した。動作や衣服によるアーチファクトを除去するために, 電極の表面をサージカルテープで覆った。心電計は日本光電社製, WEB-5000を使用した。次に, 呼吸の瞬時換気流速を記録するために, 呼気ガス測定用のマスクを装着した。マスク装着による心理的な影響²⁰⁾が生じないように, マスク装着による苦痛とマスク装着前と比べて心拍数の増加がないことを確認した。また, 測定中は覚醒状態を保ち, 無言で咳, 溜息をせず, 随意的呼吸を保つように指示した。瞬時肺流速の計測はミナト医科学社製, AE-280を使用した。心電図, 瞬時呼吸流速は, ストレッチング前10分からストレッチング中の10分, およびストレッチング後の10分, 計30分間にわたって連続して記録し, 各指標についてそれぞれの時期の平均値を採用した。

ストレッチングは, 下腿三頭筋を対象筋として, 足関節を一定の速度と圧で他動的に背屈させるため, 等速性

図1 実験課題の手続き

筋力評価訓練装置 (サイベックス, CYBEX770-NORM) を用いた。駆動コントロールプログラムの安全性を確保するために動作試験を厳密に実施した上で実験に用いた。ストレッチング中の足関節背屈角度の変化は、デジタルゴニオメータ M180 型 (ディケイエイチ) を足関節に装着して測定した。

心電図, 瞬時呼吸流速, 足関節背屈角度データは, コンピュータの AD コンバーター (キッセイコムテック) へ入力した。使用した AD コンバーターは 16 ビット精度の分解能, 1 kHz のサンプリングレートでこれらのチャンネルからのデータを Vital Recorder 2 (キッセイコムテック) で同時記録した。

得られた心電図のデータから, 心拍変動解析を行った。心拍変動解析は, 高速フーリエ変換 (fast Fourier transformation: FFT) による心拍変動スペクトルから自律神経の交感神経と副交感神経活動の推定をするためにオープンソース (GPL ライセンス) のフランス国立情報学自動制御研究所 (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique: INRIA) で開発された Scilab (version 5.4.1) を使用した。1 kHz のサンプリング周波数で採集された心電図のローデータより心電図上の QRS 波の一次微分係数からゼロクロス求め, QRS 波の頂点を検出した。標準偏差の ± 2 の外側のデータを人工産物とみなして除去し, R-R 間隔を 2 Hz で線形補間した後, FFT でパワースペクトル解析を行った。先行研究に従い¹³⁻¹⁹, 0.15-0.5 Hz の高周波帯域のスペクトル (以下, HF) は副交感神経のブロッカーであるアトロピンで消失することから, 副交感神経活動の指標は HF とした。0.03-0.15 Hz の低周波帯域におけるスペクトル (以下, LF) は交感神経ブロッカーで著しく減少するが, 残りの成分がアトロピンの影響でさらに減少することから, 交

図2 pre-ST と post-ST の心拍変動パワースペクトログラムの代表例

感神経活動の指標は LF の和と HF の和の両者の比 (LF/HF) とした。また, 瞬時肺流速計により瞬時換気流速を測定し, 平均ピーク周波数から分時呼吸数を求め, 呼吸数の増減から交感神経, 副交感神経活動を検討した。

ストレッチングによる自律神経活動の変化の検討は, pre-ST, post-ST の値と ST 中の値を比較した。統計解析は, 反復測定による分散分析を行い, 有意差を認めた場合には Tukey 法を用い多重比較を行った。ストレッチング感は ST 中と post-ST を比較するため, 対応のある t 検定を用いた。また, 自律神経活動とストレッチング感の関係を検討するために, pre-ST の測定値を基準値として, ST 中と post-ST での自律神経活動の変化率とストレッチング感について Pearson の相関係数の検定を行った。統計解析には SPSS (PASW Statistics 18.0) を用い, 統計的有意水準は 5% 未満とした。

III. 結果

ST, post-ST のストレッチング感について, 気持ちの良さに関する評価の平均値はそれぞれ 4.9 ± 0.7 , 4.0 ± 0.7 であった。これらの間に有意差は認められなかったが, 10 名全員がストレッチング開始直後 (駆動直後) からストレッチング終了後も気持ちが良いと回答した。ストレッチング感について, 痛みの訴えは皆無であった。

pre-ST, ST 中, post-ST の平均心拍数はそれぞれ 60.1 ± 9.1 , 60.4 ± 9.3 , 59.9 ± 9.1 (平均 $\pm$ 標準誤差) beats/min であった。これらの間に有意差は認められなかった。

pre-ST と post-ST の FFT による心拍変動スペクトルの代表例の結果を図 2 に示す。副交感神経活動を反映する HF 帯域のピーク値は pre-ST と post-ST で $112.7 \text{ beats/min}^2/\text{Hz}$ と $257.3 \text{ beats/min}^2/\text{Hz}$ で, HF は $1306 \text{ beats/min}^2/\text{Hz}$ と $1929 \text{ beats/min}^2/\text{Hz}$ で, post-ST で 147% の増加を示している。逆に交感神経活動を反映する LF/HF は 0.38 から 0.36 へ 7% の減少を示している。

pre-ST, ST 中, post-ST の平均 LF/HF はそれぞれ 0.594

± 0.155 , 0.485 ± 0.088 , 0.305 ± 0.054 (平均 $\pm$ 標準誤差)であった。pre-STとpost-STの比較で有意差が認められ、post-STのLF/HFはpre-STと比べて49%減少した。ST中とpre-STおよびpost-STの間に有意差は認められなかった。LF/HFと気持ちの良さの相関については、ST中ではLF/HFと気持ちの良さとの間に有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.20$)。post-STではLF/HFが低下した被験者ほど気持ちの良さが高い傾向を示したが、有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.44$)。

pre-ST, ST中, post-STの平均HFはそれぞれ 3537.3 ± 888.2 , 3556.1 ± 810.2 , 5419.7 ± 1098.7 (平均 $\pm$ 標準誤差) beats/min²/Hzであった。これらpre-STとpost-STの間に有意差が認められ、post-STのHFはpre-STと比べて53%増加した。HFと気持ち良さの相関については、ST中, post-ST共にHFと気持ち良さの間に有意な相関関係は認められなかった (ST中: $r = 0.14$, post-ST: $r = 0.04$)。

pre-ST, ST中, post-STの瞬時呼吸流速の平均ピーク周波数はそれぞれ 0.251 ± 0.017 , 0.254 ± 0.016 , 0.229 ± 0.019 (平均 $\pm$ 標準誤差) Hzであり、ピーク周波数を分時呼吸数に換算すると、それぞれ15.1, 15.2, 13.7回/分であった。post-STはpre-STとST中と比べて有意に減少した。

IV. 考察

モータ駆動でストレッチングを制御して、下腿三頭筋に対するSTを行った際の被験者のリラクセーション評価を行った。post-STにおけるHFの増加、LF/HFの低下および呼吸周期の低下が確認されたことはヒト骨格筋のストレッチングに関する従来の生理学的研究⁹⁻¹²⁾や臨床的研究³⁻⁸⁾の結果と一致した。心拍変動の高周波帯域における呼吸性成分の揺らぎはアトロピンで完全にブロックされることから副交感神経活動と広く見なされている¹⁹⁾。低周波成分に関しては交感神経ブロッカーで完全にブロックされず副交感神経成分が残ることから低周波成分と高周波成分の比が交感神経の活動と見なされている¹⁹⁾。したがって、本研究で観察されたHFの増加は副交感神経活動の亢進、またLF/HFの低下は交感神経活動の減衰と示唆される。呼吸の周期と心拍変動は0.9以上の高いコヒーレンスを有することから(周波数間のパワーの線形相関)、伝達関数解析が可能である。それによると、瞬時呼吸流量と心拍変動のゲイン (liter/bpm) は呼吸周期 (Hz) に対して指数関数的に減少する一次のローパスフィルターであることが分かっている¹⁷⁾。すなわち、呼吸周期が遅くなれば心拍変動は指数関数的に増加し、速くなれば減衰する。呼吸周期の遅延と一回換気量の増大が交感神経活動を抑制することから²¹⁾、本研究におけるHFの増加とLF/HFの低下の理由のひとつとして呼吸

流速のパワーの増大および呼吸周期の遅さが原因として考えられる。一方、呼吸法を取り入れたヨガのストレッチングでは効果的に副交感神経活動を亢進させると報告されている²²⁾ように、遅く深い呼吸により自律神経活動を制御することが明らかにされている。しかし、本研究では呼吸制御を行っていないため、STにより加えられた筋の機械受容器への伸張刺激が交感神経を抑制し、呼吸周期の遅れを引き起こし、ST後より副交感神経活動が亢進すると考えられた。呼吸周期を意識しなくても、ST終了後には、呼吸周期の低下、副交感神経の活動性の亢進、交感神経活動の減少を認めたことから、下腿三頭筋のSTがリラクセーションを誘発することが示唆された。本研究結果より、STのリラクセーション効果は、ST中よりもST後にははっきりと認められた。STのリラクセーション効果を高めるためには、ST中はゆっくりとした呼吸をすることを意識させ、リラクセーション効果が現れるST後には十分な安静時間をとることが大切であると考えられた。本研究の対象は健康成人男子であり、今後は呼吸器疾患や寝たきりによる廃用症候群についても検討を加え、STの臨床活用について検証する必要があると考えられる。

本研究ではST中にHFの有意な増加、呼吸周期の遅れは認められなかったが、筋の伸張による気持ちの良さは感受されていた。これに関しては、今後さらなる研究が必要であると考ええる。従来のストレッチングの研究では、ストレッチング中は頻脈、収縮期と拡張期の昇圧が観察され、交感神経活動の亢進が示されている^{10,11)}。本研究では、ストレッチング中の交感神経活動の亢進は認められなかった。この違いはストレッチング課題のプロトコルの違い、あるいは10分間という長い時間における平均値を求めていることが関係しているのかもしれない。今後はST中のデータ解析を10分間の平均値ではなく、時間分解能を高くして、さらにストレッチング期を複数に分けた詳細な検討が必要であると考ええる。

引用文献

- 1) Anderson B: STRETCHING. Shelter publications, California, 1980, pp8-13.
- 2) 伊藤マモル, 中澤 史, 朝比奈茂・他: ストレッチングが計算課題遂行数と気分尺度に及ぼす効果. 法政大学体育・スポーツ研究センター紀要, 2011, 29: 19-28.
- 3) Yung P, French P, Leung B: Relaxation training as complementary therapy for mild hypertension control and the implications of evidence-based medicine. Complement Ther Nurs Midwifery, 2001, 7(2): 59-65.
- 4) Yeo S: Prenatal Stretching Exercise and Autonomic Responses. J Nurs Scholarsh, 2010, 42(2): 113-121.
- 5) 北堂真子: 良質な睡眠のための環境づくり. バイオメカニズム学会誌, 2002, 9(4): 194-198.
- 6) 北嶋義典, 青木賢宏, 杉本 淳・他: 低強度・高頻度の運

- 動プログラムが不眠感を有する女性高齢者の睡眠に及ぼす影響—ランダム化比較試験—. 体力研究, 2010, 108: 8-17.
- 7) Hallegraeff JM, van der Schans CP, de Ruiter R, et al.: Stretching before sleep reduces the frequency and severity of nocturnal leg cramps in older adults. : a randomised trial. J Physiother, 2012, 58(1): 17-22.
- 8) Tworoger SS, Yasui Y, Vitiello MV, et al.: Effects of a yearlong moderate-intensity exercise and a stretching intervention on sleep quality in postmenopausal women. Sleep, 2003; 26(7): 830-836.
- 9) 齊藤 剛, 山本健太, 吉岡 哲・他: ストレッチによる大脳皮質活動, 心臓自律系活動及び筋末梢循環・代謝反応の変化に及ぼす影響. 体力科学, 1999, 48(6): 862.
- 10) 齊藤 剛, 保野孝弘, 宮地元彦: ストレッチングの生理学大脳皮質・自律神経系活動および全身循環への影響. 運動・物理療法, 2001, 12(1): 2-9.
- 11) 稲見崇孝, 清水卓也, 馬場礼三: ストレッチングが自律神経活動, 末梢血管抵抗, 身循環応答に及ぼす影響. 医学と生物学, 2011, 155(9): 577-587.
- 12) Farinatti PT, Brandão C, Soares PF, et al.: Acute effects of stretching exercise on the heart rate variability in subjects with low flexibility levels. J Strength Cond Res, 2011, 25(6): 1579-1585.
- 13) Sayers BM: Analysis of heart rate variability. Ergonomics, 1973, 16(1): 17-32.
- 14) Chess GF, Tam RM, Calaresu FR: Influence of cardiac neural input on rhythmic variations of heart period in the cat. Am J Physiol, 1975, 228(3): 775-780.
- 15) Akselrod S, Gordon D, Madwed JB, et al.: Hemodynamic regulation: investigation by spectral analysis. Am J Physiol, 1985, 249(4 Pt 2): H867-H875.
- 16) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, et al.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. Science, 1981, 213(4504): 220-222.
- 17) Saul JP, Berger RD, Chen MH, et al.: Transfer function analysis of autonomic regulation II. Respiratory sinus arrhythmia. Am J Physiol, 1989, 256(1 Pt 2): H153-H161.
- 18) Malliani A, Pagani M, Lombardi F, et al.: Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. Circulation, 1991, 84(2): 482-492.
- 19) Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology: Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Circulation, 1996, 93(5): 1043-1065.
- 20) 景山 剛, 中村好男: 呼気ガス分析器のマスク装着による心理的不安が主観的運動強度と心拍数に与える影響について. JJCR, 2013, 18(1): 94-98.
- 21) Goso Y, Asanoi H, Ishise H, et al.: Respiratory modulation of muscle sympathetic nerve activity in patients with chronic heart failure. Circulation, 2001, 104(4): 418-423.
- 22) Khattab K, Khattab AA, Ortak J, et al.: Iyengar yoga increases cardiac parasympathetic nervous modulation among healthy yoga practitioners. Evid Based Complement Alternat Med, 2007, 4(4): 511-517.