

Original Article

下肢筋への静的および動的ストレッチングによる漸増負荷運動時の酸素摂取量および心拍変動、筋酸素動態、筋電図周波数に及ぼす影響

氏川拓也^{1,2,3} 古我知成^{1,2}¹川崎医療福祉大学リハビリテーション学部理学療法学科²川崎医療福祉大学大学院医療技術学研究科リハビリテーション学専攻³川崎医科大学附属病院リハビリテーションセンター

要旨

Ujikawa T, Koga T. Effects of static and dynamic stretching of lower limb muscles on oxygen uptake, heart rate variability, oxidized hemoglobin of muscular blood vessels and muscular discharges during incremental exercise. Jpn J Compr Rehabil Sci 2020; 11: 59–64.

【目的】運動準備段階でのウォーミングアップ (WU) として、静的 (SS) もしくは動的ストレッチング (DS), 20watts での自転車エルゴメーター駆動 (ergo) の 3 種類を行い、漸増負荷運動時における心肺機能と筋活動にどのような影響を与えるのかを検討した。

【方法】健康成人男性 10 名 (20.6±0.5 歳) を対象に、上記 WU を行われた後、漸増負荷運動を課し、酸素摂取量、心拍変動、筋酸素動態を連続記録した。

【結果】DS および ergo 直後では、SS 直後に比べて、心拍変動から解析された交感神経活動指標、酸素摂取量、心拍出量は有意に上昇し、逆に副交感神経活動指標、筋酸素動態は有意に低下した。しかし、嫌気性代謝閾値到達時にはこれらの値に差が認められなかった。

【結論】DS および ergo は、運動に対する適応性を高める準備効果が示唆されたが、嫌気性代謝閾値レベルの運動時には影響を与えないことが明らかになった。

キーワード: 静的ストレッチング、動的ストレッチング、漸増負荷運動、自律神経系活動、筋活動

はじめに

運動の前には傷害の予防かつ高い運動パフォーマンスを発揮するためにウォーミングアップ (warming up: 以下, WU) が実施されることが多い。WU は筋収縮による血液循環の促進や筋温を上昇させ、結合組織の伸展性を高め、筋の弾性を高めることによる骨格

筋の傷害を予防することを目的としている [1]。WU にはストレッチングがよく用いられており、筋を伸張させることによる筋の柔軟性向上などを目的に行われ、主に静的ストレッチング (static stretching: 以下, SS) と動的ストレッチング (dynamic stretching: 以下, DS) に分類される。SS はターゲットとなる筋群をゆっくりと関節可動域の限界まで伸張させ、限界の肢位で 20~30 秒保持する [2]。反動を用いずにゆっくりと筋を伸張させることから、伸張された腱のゴルジ腱器官から信号が脊髄に入力され、脊髄内で抑制性ニューロンを介して伸張された筋の前角細胞を抑制する [3]。ゆっくりと筋を伸張することで伸張反射が生じにくい方法であり、伸張された筋の筋緊張は低下する [2, 3]。DS は自動運動により筋の伸張と短縮を繰り返すことで拮抗筋の伸張効果を得る方法である。また、DS では関節可動域の最終域まで反動を使わずに大きく動かすことが基本とされ、最終域での相反抑制効果によって拮抗筋の伸張効果がより得られる [4]。これまでストレッチングの即時的な効果に関しては、いくつか報告がされている。野口ら [5] はヒラメ筋に対して 2 分間の SS を施行することで足関節背屈角度が有意に増大したが、ヒラメ筋血流量に有意な差を認めなかったと報告している。一方で DS に関しては、立位姿勢で膝関節伸展位での股関節屈曲運動を繰り返すことで、直後にハムストリングスの柔軟性が向上し、筋トルク値と筋電積分値が維持されたと報告されている [6]。

漸増負荷運動により得られる嫌気性代謝閾値 (anaerobic threshold: 以下, AT) は酸素摂取量 (oxygen uptake: 以下, $\dot{V}O_2$) と二酸化炭素排泄量 (carbon dioxide output: 以下, $\dot{V}CO_2$) の平衡関係が保たれる最大の $\dot{V}O_2$ のことであり、運動耐容能の指標として知られている [7]。AT レベルでの運動であれば、血中カテコラミンの著明な上昇やアシドーシスが生じないとされ、運動処方の際に用いられている [8, 9]。他にも漸増負荷運動により得られる最大負荷時の $\dot{V}O_2$ である最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake: 以下, peak) は、心疾患患者の予後の指標とされている [7]。このような AT レベルや peak 到達時に、あらかじめ下肢筋に対して施行した SS もしくは DS が、運動耐容能や自律神経系にどのような影響を及ぼすかについて検討することは、WU 効果の検証やリスク管理にお

著者連絡先：氏川拓也

川崎医療福祉大学

〒701-0193 岡山県倉敷市松島 288

E-mail: ujikawa@mw.kawasaki-m.ac.jp

2020 年 2 月 25 日受理

利益相反：本研究において一切の利益相反はありません。

いて有意義であると考えられる。

そこで、本研究では健康成人男性を対象に、運動準備段階での3種類のWU、すなわち、下肢筋へのSSもしくはDSの施行、コントロールとしての20wattsでの自転車エルゴメーター駆動が、漸増負荷運動時の酸素摂取量、換気量、心拍変動、筋酸素動態、筋電図周波数にどのような影響を及ぼすかを比較検討した。

方法

1. 対象

本研究の対象は呼吸器、循環器疾患、ならびに下肢に運動器疾患の現病、既往のない健康成人男性10名（年齢 20.6 ± 0.5 歳、身長 168.3 ± 6.1 cm、体重 62.8 ± 9.5 kg）とした。本研究を実施する際には、実験開始前に紙面および口頭にて研究の目的・方法に関して詳しく説明を行い、署名によって同意を得た。なお、本研究は川崎医療福祉大学の倫理審査委員会の承認（承認番号：第18-063号）を受け実施した。

2. 方法

被験者には測定開始24時間前からアルコールの摂取や激しい運動を避けさせ、また測定の2時間前から絶食とさせた。実験の前に体調について聴取し、良好な場合に限り、実験を施行した。

2.1 測定項目

心電図を導出するために無線搬送式心電計（Trigno Wireless System, Trigno社）を用い、ボタン型ディスプレイ電極を前胸部に貼付した。筋電図を導出するために3軸加速度計内蔵の無線搬送式筋電計（Trigno Wireless System, Trigno社）を用い、センサーを外側広筋と腓腹筋外側頭に貼付した。貼付部位は、外側広筋では上前腸骨棘と膝蓋骨外側を結ぶ線の2/3、腓腹筋外側頭では腓骨頭と踵を結ぶ線の1/3とした[10]。導出した心電図と筋電図の記録には、Trigno Wireless Systemと接続したコンピュータでWindows版LabChart ver.7（ADInstruments社製）を用いた。筋酸素動態を測定するために近赤外線分光法（near-infrared spectroscopy: 以下、NIRS）（多チャンネル組織酸素計Hb14-2, ASTEM社）の空間分解分光法を用い、プローブを外側広筋と腓腹筋外側頭に貼付した。貼付部位は筋電計のセンサーの近接部位とし、測定データは計測表示プログラムHb14 Ver1.04で記録した。NIRSの測定値は、超音波診断装置（Prosound SSD-3500SX, アロカ社）を用いて筋表面の皮下脂肪厚を測定し、補正した。呼気ガス濃度と換気量を測定するために、呼気ガス分析装置（AT-1100A, ANIMA社）のbreath-by-breath法を用い、測定データはソフトウェアAT-1100Aで記録した。

2.2 実験プロトコル

漸増負荷運動は自転車エルゴメーター（Strength ergo 8, 三菱電機エンジニアリング社）を使用し、サドルの高さはペダルが最低点に位置したときに踵をペダルの中央に置き、膝関節伸展位となるよう調節した。足部の位置はペダル中心軸上に第2中足骨頭が位置するように設定した。安静3分間の後、WUを4分

間行わせ、20 watts/minの漸増負荷運動をペダル回転率60 rpmで行わせた。漸増負荷運動の終点は、ペダル回転率が50 rpmを3秒以上下回った場合、もしくは被験者から運動継続困難の訴えがあった場合とした。

2.3 ウォーミングアップの種類

漸増負荷運動前に行うWUとして、次の3条件を設定した。①20 wattsでの自転車エルゴメーター駆動（ergo条件）、②外側広筋と腓腹筋外側頭に対する自己でのSS試行（SS条件）、③外側広筋と腓腹筋外側頭に対するDS施行（DS条件）とし、各被験者には3条件すべての実験に参加してもらい、実験の順番はランダムに決定した。これら3つの条件下での実験は、疲労の影響を除外するため、48時間以上の間隔をあけて実施した。

ergo条件では、サドルの高さと足部の位置は漸増負荷運動時と同条件とし、自転車エルゴメーター駆動を負荷強度20 watts、ペダル回転率を60 rpmで4分間維持させた。自転車エルゴメーター駆動は漸増負荷運動前に行われるWUとして一般的であるため、コントロールとして用いた。SS条件では、左大腿四頭筋、右大腿四頭筋、左下腿三頭筋、右下腿三頭筋の順にそれぞれ20秒間のゆっくり自分で伸張してもらう手順を2セット行わせた[11, 12]。伸張する強度は、適度な筋の張りを感じ、痛みを感じる手前とした[13]。DS条件では、大腿四頭筋群に対しては直立姿勢から股関節中間位を保持した状態での膝関節屈伸運動を、下腿三頭筋群に対しては立位での足関節底背屈運動をはじめにゆっくり大きく5回、続いて速くかつ力強く10回の施行を1セットとし[2]、大腿四頭筋群、下腿三頭筋群の順に2セットを繰り返した。

2.4 測定項目とデータ解析

3軸加速度計よりペダリング動作1周期を求め、ペダリング動作3周期分をデータとして採用し、平均パワー周波数（mean power frequency: 以下、MPF）を算出し、筋疲労の指標とした[14]。心拍数（heart rate: 以下、HR）に加えて、心拍変動の周波数解析により、0~0.04 Hzの超低周波成分（very low frequency: 以下、VLF）、0.04~0.15 Hzの低周波成分（low frequency: 以下、LF）、0.15~0.40 Hzの高周波成分（high frequency: 以下、HF）、0~0.40 Hzの全周波数成分（total power: 以下、TP）を求めた。HFをTPとVLFで補正したものをHF normalized unit（HF nu） $= HF \times 100 / (TP - VLF)$ として副交感神経活動の指標、LF/HFを交感神経活動の指標とした。漸増負荷運動の終点付近では、R-R間隔変動はホワイトノイズに近くなり自律神経活動に関する情報が著しく減少するとされているため[15]、本研究ではATレベル以降におけるLF/HFとHF nuを解析対象から除外した。皮下脂肪厚で補正した酸素化ヘモグロビン量（oxygen hemoglobin: 以下、Oxy-Hb）を測定して、10秒間の平均値を算出し、筋酸素動態の指標とした。分時換気量（minute ventilation: 以下、 \dot{V}_E ）、 \dot{V}_{O_2}/kg を算出し、V-slope法を用いてATを決定した。 \dot{V}_{O_2} とHRから一回心拍出量（stroke volume: 以下、SV）を算出し[16]、SVとHRの積から心拍出量（cardiac output: 以下、CO）を算出した。

2.5 統計解析

統計学的解析には、SPSS ver.22.0 (IBM 社) を用い、有意水準は 5% とした。条件間の比較には Friedman 検定の後、Wilcoxon の符号付順位検定を行い、Holm 法にて補正した。

結果

実験環境は、温度 $24.5 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $44.8 \pm 6.1\%$ であった。また、本実験では 3 種類の WU を施行したが、実験を途中で中止した被験者はいなかった。HR、交感神経活動の指標である LF/HF、 $\dot{V}\text{E}$ 、 $\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$ 、CO は安静時から WU 時、AT レベル、peak 到達時と徐々に上昇し、副交感神経活動の指標である HF nu は徐々に低下した (表 1, 2)。

1. 安静時における各指標の比較

WU を始める前の安静時では、すべてのパラメー

ター (HR, HF nu, LF/HF, $\dot{V}\text{E}$, $\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$, CO, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb) において 3 条件間に有意な差は認められなかった (表 1-3)。

2. WU 時における各指標の比較

ergo 条件および DS 条件では SS 条件と比べて、HR, LF/HF, $\dot{V}\text{E}$, $\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$, CO は有意な上昇が認められ ($p < 0.05$)、HF nu, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb は有意な低下が認められた (表 1-3)。

3. AT および peak 到達時における各指標の比較

WU の違いが運動耐容能に及ぼす影響を検討するために、AT レベルおよび最大負荷量を比較したが、AT レベルの負荷量、最大負荷量ともに 3 条件間に有意な差は認められなかった (表 4)。また、測定したすべてのパラメーター (HR, HF nu, LF/HF, $\dot{V}\text{E}$, $\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$, CO, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb, 外側広筋と腓腹筋外側頭の MPF) において 3 条件間に有意な差は

表 1. WU (ウォーミングアップ) 条件間における心拍変動の比較

		ergo	SS	DS
HR (bpm)	安静	75.1 ± 6.4	75.1 ± 6.9	73.2 ± 9.0
	WU	92.9 ± 6.5	$81.1 \pm 7.1^*$	$90.8 \pm 8.8^{\dagger}$
	AT	115.6 ± 6.9	108.2 ± 9.7	113.1 ± 8.9
	peak	185.2 ± 13.4	180.0 ± 16.1	187.6 ± 12.0
HF nu (nu)	安静	52.1 ± 7.0	55.2 ± 10.6	54.6 ± 3.9
	WU	21.5 ± 7.4	$44.5 \pm 10.1^*$	$19.3 \pm 7.2^{\dagger}$
	AT	6.3 ± 3.0	8.4 ± 2.2	7.2 ± 2.4
LF/HF	安静	1.4 ± 0.5	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.3
	WU	3.2 ± 1.2	$1.7 \pm 0.4^*$	$3.0 \pm 0.2^{\dagger}$
	AT	7.5 ± 3.1	8.0 ± 1.3	7.5 ± 1.6

平均値 \pm 標準偏差

* $p < 0.05$ ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件, $^{\dagger}p < 0.05$ SS 条件 vs. DS 条件.

AT: 嫌気性代謝閾値 (anaerobic threshold); peak: 最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake); SS: スタティックスストレッチング (static stretching); DS: ダイナミックストレッチング (dynamic stretching); HR: 心拍数 (heart rate); HF: 高周波成分 (high frequency); LF: 低周波成分 (low frequency)。

表 2. WU 条件間における呼気ガスと換気量の比較

		ergo	SS	DS
$\dot{V}\text{E}$ (L/min)	安静	7.0 ± 1.8	6.9 ± 1.4	6.6 ± 1.7
	WU	13.7 ± 1.9	$9.9 \pm 1.6^*$	$12.2 \pm 2.6^{\dagger}$
	AT	24.3 ± 6.8	24.8 ± 6.3	27.0 ± 7.0
	peak	91.0 ± 24.7	92.9 ± 26.5	97.9 ± 23.8
$\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$ (mL/min/kg)	安静	4.0 ± 0.7	4.4 ± 1.1	4.1 ± 0.8
	WU	8.9 ± 1.4	$6.3 \pm 1.1^*$	$7.6 \pm 1.3^{* \dagger}$
	AT	17.9 ± 4.9	18.1 ± 3.5	20.5 ± 6.4
	Peak	40.7 ± 6.8	39.5 ± 3.5	41.9 ± 6.2
CO (L/min)	安静	3.7 ± 0.7	4.0 ± 0.6	3.8 ± 0.9
	WU	7.0 ± 1.0	$5.3 \pm 0.9^*$	$6.3 \pm 1.2^{\dagger}$
	AT	10.9 ± 2.0	10.9 ± 1.5	11.6 ± 2.1
	peak	16.1 ± 2.6	15.7 ± 2.2	16.7 ± 2.5

平均値 \pm 標準偏差

* $p < 0.05$ ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件, $^{\dagger}p < 0.05$ SS 条件 vs. DS 条件.

$\dot{V}\text{E}$: 分時換気量 (minute ventilation); $\dot{V}\text{O}_2$: 酸素摂取量 (oxygen uptake); CO: 心拍出量 (cardiac output)。

表 3. WU 条件間における筋酸素動態の比較

		ergo	SS	DS
Oxy-Hb (μM) 外側広筋	安静	39.0 \pm 16.6	39.7 \pm 16.1	41.2 \pm 12.3
	WU	32.3 \pm 10.0	40.2 \pm 14.4*	32.8 \pm 9.4 [†]
	AT	36.2 \pm 13.6	38.7 \pm 16.1	40.7 \pm 8.4
	peak	38.9 \pm 13.9	37.5 \pm 12.8	38.6 \pm 8.9
Oxy-Hb (μM) 腓腹筋外側頭	安静	50.1 \pm 12.8	42.5 \pm 12.9	51.8 \pm 15.4
	WU	35.6 \pm 9.9	42.7 \pm 12.4*	34.6 \pm 9.5 [†]
	AT	43.6 \pm 10.2	37.7 \pm 13.7	43.7 \pm 9.8
	peak	40.4 \pm 11.6	34.4 \pm 10.0	39.8 \pm 12.5

平均値 \pm 標準偏差

* $p < 0.05$ ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件. [†] $p < 0.05$ SS 条件 vs. DS 条件.

Oxy-Hb: 酸素化ヘモグロビン (oxygen hemoglobin).

表 4. WU 条件間における負荷量の比較

		ergo	SS	DS
負荷量 (W)	AT	85.0 \pm 19.6	82.5 \pm 16.2	87.6 \pm 22.8
	peak	237.3 \pm 42.4	232.7 \pm 43.6	241.1 \pm 45.9

平均値 \pm 標準偏差

表 5. WU 条件間における筋電図周波数の比較

		ergo	SS	DS
MPF (Hz) 外側広筋	AT	72.2 \pm 13.8	76.1 \pm 13.9	79.4 \pm 15.3
	peak	70.2 \pm 7.5	73.4 \pm 13.5	77.9 \pm 14.5
MPF (Hz) 腓腹筋外側頭	AT	117.9 \pm 12.6	111.9 \pm 17.8	108.8 \pm 19.6
	peak	112.1 \pm 32.5	109.7 \pm 21.0	109.9 \pm 33.1

平均値 \pm 標準偏差

MPF: 中央パワー周波数 (mean power frequency).

認められなかった (表 1-3, 5).

考察

WU としてストレッチングは一般的に行われている。これまでに SS では筋の柔軟性向上の効果があるとされているが、一時的に筋力低下が生じることがあると報告されている [2, 3, 17]。DS では筋の柔軟性向上の他に、最大筋力や膝伸展パワーの増加、敏捷性の向上効果があるとされている [6, 18, 19]。同一被験者、同一の漸増負荷運動を用いて、下肢筋に対する SS および DS、自転車エルゴメーター駆動が WU 時や AT レベル、peak 到達時における運動機能や自律神経系に及ぼす効果について検討することは、WU 効果の検証やリスク管理において必要である。そこで本研究では、下肢筋に対する SS および DS、自転車エルゴメーター駆動による WU 時と漸増負荷運動時の酸素摂取量および心拍変動、筋酸素動態、筋電図周波数に及ぼす効果について検討した。

WU 時において SS 条件より ergo 条件と DS 条件で、 $\dot{V}\text{O}_2/\text{kg}$ が高値を示しており、 $\dot{V}\text{O}_2$ は全身への外的負荷量を反映する指標とされていることから [20]、

SS 条件より ergo 条件と DS 条件で負荷強度が高かったと考えられる。SS 条件より ergo 条件と DS 条件で、HR, LF/HF, $\dot{V}\text{E}$, CO が高値であり、HF nu が低値を示していたが、運動負荷がかかることで HR, LF/HF, $\dot{V}\text{E}$, CO の上昇、HF nu の低下を生じることから、SS 条件より ergo 条件と DS 条件において負荷強度が高い状態であったことで生じていたと考えられる。また、Oxy-Hb では、SS 条件より ergo 条件と DS 条件で有意に低値を示した。これは ergo 条件と DS 条件で SS 条件より負荷強度が強く、末梢での酸素消費が高まったためと考えられる。SS は持続的に筋を伸張させることで、伸張された腱からの I b 信号によって、脊髄前角細胞の興奮性を抑制し、その筋の緊張を和らげる作用がある [3] とされており、能動的な筋収縮を伴わない方法である。一方で、DS は伸張したい筋の拮抗筋を反復して収縮させ、目的の筋を能動的な筋収縮を用いてストレッチングする方法であり、筋温の上昇効果と拮抗筋の収縮による相反抑制効果が影響しているとされている [21-24]。自転車エルゴメーター駆動も能動的な筋収縮を伴っており、このような能動的な筋収縮の有無によって SS 条件より ergo 条件と DS 条件で負荷強度が高くなっていったと考えられる。

以上より、WU 時においては、SS と比較して ergo と DS で呼吸器と循環器系への負荷や骨格筋の代謝向上が大きく、運動への適応性を高める準備効果があることが示唆された。

すべてのパラメーターにおいて、AT レベル、peak 到達時に各条件間で有意な差は認められなかった。足関節底背屈運動により上昇した HR や LF/HF、低下した HF が運動後 2 分には低下もしくは上昇していたと報告されている [25]。また、運動強度 75 watts での自転車エルゴメーター駆動による WU 後、5 分以内に安静状態まで HR が戻っていたとされている [26]。これらの報告から、低強度の運動であれば 2 分以内に、中等度の強度の運動でも 5 分以内に安静状態まで戻ると推察される。本研究では自転車エルゴメーター駆動による WU を運動強度 20 watts で施行し、WU から AT レベルまで 3 分強の時間があつたことから、WU 時に生じていた効果の差がみられなくなったと考えられる。さらに、漸増負荷運動では徐々に負荷強度が増加するため、3 条件間で有意な差が認められなかったと考えられる。以上のことから、WU 時において ergo と DS は運動への適応性を高める準備効果を有する可能性はあるが、漸増負荷運動時においては AT レベル以降の各指標に 3 種類の WU で差がないため、漸増負荷運動前の WU では各個人の状態に適した WU を選択して良いと思われる。しかしながら、今回漸増負荷運動という運動様式について検討したのみであり、急激に負荷強度を増加するような運動、もしくは定常負荷運動などの運動様式でもさらなる検討が必要であると考えられる。

文献

- Katamoto S. Physiology of warming-up. *Jpn J Sports Sci* 1988; 7: 620–7. Japanese.
- Yamaguchi T, Ishii K. Stretching methods and effects. *Popular Med* 2005; 245: 24–31. Japanese.
- Imai S, Matsumoto H. Effect of static stretching. *J Clin Sports Med* 2015; 32: 446–51. Japanese.
- Samukawa M. Basics and effects of dynamic stretching. *J Clin Sports Med* 2015; 32: 452–5. Japanese.
- Noguchi A, Sugawara K, Masaki Y, Kushida A. Effect of static and dynamic stretching on H wave and muscle blood flow in the soleus. *J Phys Ther Sci* 2014; 29: 219–23. Japanese.
- Fujibayashi N, Nara S. Acute effects of dynamic stretching. *Annu Rep Tohoku Sect Jpn Phys Ther Assoc* 2014; 26: 84–9. Japanese.
- Adachi H. Purpose of CPX. In: Adachi H, editor. *CPX, Exercise Therapy Handbook*. 4th ed. Tokyo: Cyugaiigaku; 2019. p. 1–10. Japanese.
- Ito H. Exercise therapy on the basis of AT. *Respir Circ* 1992; 40: 1173–82. Japanese.
- The Japanese Circulation Society (JCS). Guidelines for rehabilitation in patients with cardiovascular disease (JCS 2012). Available from: http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_nohara_h.pdf (cited 2019 Oct 17). Japanese.
- Shimono T. *SEMG Clinical Application Manual*. 1st ed. Tokyo: Sakai Medical; 2010. p. 123–59. Japanese.
- Kuriyama S. *Quadriceps, Stretching and Muscle Anatomy*. 2nd ed. Tokyo: Nankodo; 2013. p. 107–14. Japanese.
- Kuriyama S. *Hamstrings, Stretching and Muscle Anatomy*. 2nd ed. Tokyo: Nankodo; 2013. p. 115–30. Japanese.
- Kimoto Y, Shindo S. Time course effects of static stretching on measures of strength and range of motion of the hamstring muscle. *Bull Grad Sch Health Sci Akita Univ* 2011; 19: 27–33. Japanese.
- Nagata A. Muscle fatigue and exercise adaptation. In: *Muscle and Muscle Science*. 1st ed. Tokyo: Fumaido; 1984. p. 115–25. Japanese.
- Fujisawa H. Study on autonomic nervous activity evaluation by electrocardiogram analysis. Available from: <http://ir.lib.muroran-it.ac.jp/dspace/handle/10258/2076>. (cited 2019 Oct 31). Japanese.
- Stringer WW, Hansen JE, Wasserman K. Cardiac output estimated noninvasively from oxygen uptake during exercise. *J Appl Physiol* 1997; 82: 908–12.
- Kay AD, Blazevich AJ. Effect of acute static stretch on maximal muscle performance: a systematic review. *Med Sci Sports Exerc* 2012; 44: 154–64.
- Yamaguchi T, Ishii K. Effects of static stretching for 30 seconds and dynamic stretching on leg extension power. *J Strength Cond Res* 2005; 19: 677–83.
- Amiri-Khorasani M, Sahebozamani M, Tabrizi KG, Yusof AB. Acute effect of different stretching methods on illinois agility test in soccer players. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 2698–704.
- Ueshima K. In carrying out the cardiopulmonary exercise test. In: *Exercise Test*. 2nd ed. Tokyo: Nankodo; 2013. p. 133–169. Japanese.
- Ichihashi N. Exercise therapy for range of motion limitation. In: *Therapeutic Exercise*. 1st ed. Tokyo: Bunkodo; 2014. p. 148–71. Japanese.
- Manoel ME, Harris-Love MO, Danoff JV, Miller TA. Acute effects of static, dynamic, and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on muscle power in women. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 1528–34.
- Herda TJ, Cramer JT, Ryan ED, McHugh MP, Stout JR. Acute effects of static versus dynamic stretching on isometric peak torque, electromyography, and mechanomyography of the biceps femoris muscle. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 809–17.
- Behm DG, Plewe S, Grage P, Rabbani A, Beigi HT, Byrne JM, Button DC. Relative static stretch-induced impairments and dynamic stretch-induced enhancements are similar in young and middle-aged men. *Appl Physiol Nutr Metab* 2011; 36: 790–7.
- Akiba T, Ogawa A, Terayama K, Tsuchiya A, Nakagawa K, Sakakibara R, et al. Effects of ankle plantar- and dorsiflexion on hemodynamics and autonomic nervous system activity. *J Phys Ther Sci* 2017; 32: 695–9. Japanese.
- Myouchin M, Kawaguchi T. The effects of warming-up on heart rate and blood pressure. *Annu Rep Tohoku Sect Jpn Phys Ther Assoc* 1996; 8: 44–6. Japanese.