

2011 年度 修士論文

ノルディック・ハムストリングスにおける
運動強度の評価

Evaluation of Intensity Level of
Nordic Hamstrings Exercise

早稲田大学大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 コーチング科学研究領域
5010A092-1

山之内 夏人

Yamanouchi, Natsuto

研究指導教員：岡田 純一 准教授

目次

I. 緒言	2
I -1. 序	2
I -2. 研究小史	2
I -3. 目的	5
II. 方法	6
II -1. 被験者	6
II -2. 試行	6
II -3. 測定項目	6
II -4. 分析	8
II -5. 統計処理	9
III. 結果	10
III -1. 筋放電量	10
III -2. 膝関節トルク	14
IV. 考察	16
IV -1. 筋放電量	16
IV -2. 膝関節トルク	16
IV -3. 肉離れ予防のエクササイズとしてのノルディック・ハムストリングス	17
IV -4. 筋力発揮の左右差	19
V. 結論	20
VI. 参考文献	21
謝辞	24

I. 緒言

I-1. 序

ハムストリングスは、股関節伸展と膝関節屈曲の機能を有し、多くの身体動作に関与する一方で、傷害の発生しやすい筋でもある(深谷ら, 1979; 小林ら, 2009; 武田, 2000)。ハムストリングスの傷害の中でも肉離れは、発生頻度(Orchard ら, 2001)と再発率(高澤, 1967; Verrall ら, 2001; 横江, 1996)が高く、その予防のためには、伸張性筋力を強化できるエクササイズが推奨されている(Khan ら, 2009)。ハムストリングスの筋力向上を目的としたエクササイズとして、従来からレッグカールが一般的に行われているが、近年、特にハムストリングスの伸張性筋力を強化できるエクササイズとして、ノルディック・ハムストリングスが考案され(Bahr ら, 2002)、急速に普及している。ノルディック・ハムストリングスは、膝立ち位でパートナーに足首を固定させ、股関節の角度を解剖学的正位に保ったまま、膝関節を徐々に伸展することにより上体を前方へゆっくりと倒すエクササイズである。従来から行われているレッグカールでは、高価なトレーニング機器が必要であり、実施する場所も限定されるのに対し、ノルディック・ハムストリングスは、高価な器具を必要とせず、自体重を用いて実施できる点でも実用的である。しかし、ノルディック・ハムストリングスは自体重を負荷として用いており、レッグカールのようなトレーニング機器を用いたエクササイズのように、負荷、反復回数およびセット数などから運動強度を明確に設定することが出来ない。トレーニングの目的の達成に向けた効率かつ安全なエクササイズの処方のためには、当該エクササイズにおける運動強度を定量的に把握しておく必要がある。そこで本研究は、ノルディック・ハムストリングスの運動強度を定量的に評価することを目的とした。

I-2. 研究小史

I-2-1. 肉離れのメカニズムに関する研究

肉離れとは、スポーツ活動などによって筋に強い張力が急激に働くことにより、筋の一部が損傷した状態をいう(武田, 2000)。武田(2000)は、肉離れの発生箇所としてハムストリングスが最も多いことを報告した。また、肉離れの多くは筋腱移行部に損傷が認められる(Comfort ら, 2009; Lepainen ら, 2007; 高澤, 1994)。肉離れの発生要因として、筋力の左右でのアンバランス(Heiser ら, 1984; Orchard ら, 1997; Yamamoto, 1993)、柔軟性の欠如(Liemohn, 1978)、筋持久力の不足(横江, 1994)、筋疲労(Agre, 1985; Devlin, 2000)、ウォーミングアップ不足(Agre, 1985; 平澤ら, 1994; Kujala ら, 1997)、伸筋・屈筋の筋力アンバランス(Burkett, 1970; Heiser ら, 1984; Yamamoto, 1993)、スポーツ動作フォームの不備(Agre, 1985; 蒲田, 2000)、肉離れの不十分な治療(Agre, 1985; Devlin, 2000; 横江, 1994)、気候(平澤ら, 1994; Orchard, 2001)、サーフェイス(Devlin,

2000 ; 平澤ら, 1994)などが考えられている。

これらの中でも多くは伸張性収縮時に起こりやすいと考えられている。Brughell ら(2008)は、スプリント動作の遊脚後期は、膝関節伸展動作の主働筋として大腿四頭筋が活動する一方で、股関節伸展動作の主働筋としてハムストリングスが活動するため、相対的に筋力の弱いハムストリングスに強い伸張性の収縮力が働き、肉離れが起きやすいことを報告した。すなわち、肉離れの発生要因の中でも特に、伸筋・屈筋の筋力アンバランスが重要であると考えられている。

I-2-2. 肉離れ予防のためのトレーニングに関する研究

肉離れを予防するためのトレーニングとしては、伸張性の筋力発揮を伴うものが効果的であると考えられる。Khan ら(2009)は、伸張性エクササイズにおいてメカノトランスダクション(mechanotransduction)が結合組織に与える役割を論じた。メカノトランスダクションとは、身体が機械的な負荷を細胞の反応に変換するプロセスである(Khan ら, 2009 ; Lorenz, 2010)。筋と腱は、伸張性エクササイズにおけるこのプロセスにより、大きな張力に対して耐性を示すと考えられる。

ハムストリングスは肉離れの好発部位であるため、肉離れに関連した研究の多くはハムストリングスを被験筋としている。Yamamoto (1993)は大学生の陸上競技選手を対象に、下肢の等速性筋力を測定した。2 年間に渡る調査の中で、学生 64 名中 26 名にハムストリングスの肉離れが発生したが、肉離れが発生した 31 脚は損傷しなかった 97 脚に比べて、大腿四頭筋に対するハムストリングスの筋力比が有意に低値であったことを報告している。また、Heiser ら(1984)は大学のフットボール選手を対象に、Cybex マシンを用い 60° /sec の速度で、大腿四頭筋に対するハムストリングスの筋力比が 0.6 以上になるようにトレーニングを実施した。その結果、ハムストリングスの肉離れの発生頻度が 534 名中 41 名(7.7%)から 564 名中 6 名(1.1%)に減少したと報告している。Yamamoto の報告や Heiser らの報告から、大腿四頭筋の筋力に対するハムストリングスの筋力比が低いとハムストリングスの肉離れが発生しやすいことや、その筋力比を高めるとハムストリングスの肉離れの予防に効果的であることが示唆される。

Mjølunes ら(2004)は、ハムストリングスの伸張性筋力を向上させる上で、レッグカールよりもノルディック・ハムストリングスの方が効果的であることを明らかにした。この研究は 21 名のサッカー選手を、伸張性のエクササイズであるノルディック・ハムストリングスを実施する群と、レッグカールの短縮性局面のみを実施させる群とに分け、10 週間のトレーニング効果を調査したものである。その結果、ノルディック・ハムストリングスを実施した群のみ、伸張性膝屈曲筋力と等尺性膝屈曲筋力が有意に向上した。Clark ら(2005)は、ノルディック・ハムストリングスを実施することで、膝屈曲最大トルクの出現する角度がより伸展位に移行することを明らかにした。ハムストリングスの筋長が長い時ほど肉離れは起こりやすいため、膝屈曲最大トルクの出現する角度が伸展位にあるほど、ハムス

トレーニングの肉離れの発生率が低いことが示されている(Brockett, 2004)。よって Clark らの研究は、ノルディック・ハムストリングスがハムストリングスの肉離れの予防に効果的であることを支持するものといえる。

以上のように、肉離れの予防のためには伸張性のエクササイズが有効であることが明らかとなっている。また、特にハムストリングスの肉離れの予防を目的とする際には、大腿四頭筋の筋力に対するハムストリングスの筋力比を特異的に高める必要があることが考えられ、それらの要素を満たすエクササイズとして近年ノルディック・ハムストリングスが普及している。

I-2-3. 筋電図を用いた筋力発揮レベルの定量化に関する研究

筋の発揮する張力を非侵襲的に直接測定することは困難である。また、関節動作は関節を回転軸とした回転運動である。そのため一般的には、関節動作の強度の定量化に際して、筋の発揮した張力が外的負荷に抵抗する値として測定される関節トルクが用いられる。しかし、膝関節を屈曲する際にハムストリングスと腓腹筋が動員されるように、一つの関節の動作には複数の筋活動が関与するために、関節トルクのみでは個々の筋に課される負荷の大きさまでは分らない。一方、筋の発揮する張力の増加は、運動単位の動員数の増加及び、より大きな運動単位の動員によって実現され、この際、筋放電量は筋力に比例して増加することが知られている(Enoka, 1994)。そのため、筋放電量は運動強度の指標として用いることができると考えられる。

筋放電量を評価指標とする筋張力の推定は以前から行われている。近年においては Burnett ら(2008)が、強度の異なる 3 種類の弾性バンドを用いたエクササイズ時の筋放電量と、Cybex マシンを用いた 3 段階の強度の筋力発揮時の筋放電量との比較から、弾性バンドの運動強度を定量化した。このように、筋力発揮レベルの定量化に筋電図を用いる研究は従来から行われている。一方、ノルディック・ハムストリングスにおける筋電図を測定した研究はいくつか見られるが(荒木, 2009; 岩下ら, 2009)、エクササイズ中の足関節あるいは股関節の肢位が筋放電量に及ぼす影響と、膝関節の角度変化が筋放電量に及ぼす影響に言及するにとどまっており、エクササイズの処方に役立つような運動強度の定量化には至っていない。

I-2-4. 先行研究のまとめと課題

ハムストリングスの肉離れの予防には、ハムストリングスの筋力を特異的に向上させる、伸張性のエクササイズが有効だといえる。この条件を満たすエクササイズとして近年、ノルディック・ハムストリングスが急速に普及しているが、その運動強度が定量的に把握されることなくエクササイズの処方がなされている。ノルディック・ハムストリングスの運動強度を定量的に把握することで、肉離れを予防するための効率かつ安全なエクササイズ処方が可能となる。

I -3. 目的

本研究は、ノルディック・ハムストリングスの動作時に得られる筋放電量と膝関節トルクから、ノルディック・ハムストリングスの運動強度を定量的に評価することを目的とした。

II. 方法

II-1. 被験者

運動習慣のある、下肢に異常のない健康な成人男性 13 名(年齢： 23.2 ± 1.4 歳、身長： 171.7 ± 4.4 cm、体重： 67.5 ± 8.5 kg)が本研究の被験者として実験に参加した。実験に先立ち、被験者に本研究の目的、方法および実験参加により起こりうるリスクについて文書ならびに口頭で十分な説明をし、同意を得た。また、本研究は、早稲田大学人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て実施された(申請番号：2011-137)。

II-2. 試行

II-2-1. ノルディック・ハムストリングス

ベンチ台の上にストレッチ用マットを敷き、その上に被験者を膝立ち位にさせた。被験者の両足首を、後述する張力計に接続したアタッチメントによって固定した(図 1)。被験者は股関節の角度を解剖学的正位に保ったまま、膝関節を伸展することで、上体を前方へゆっくりと倒した。動作速度の規定にはメトロノーム(SQ100-88、SEIKO 社製)を使用し、開始姿勢から完全にマットへ倒れこむまでを 4 秒間で完遂するよう指示した。この際、被験者は両手を胸の高さで、肩幅よりやや広く広げておき、マットに倒れ込む時に上体を支えられるようにした。

II-2-2. レッグカール運動時の伸張性膝関節屈曲筋力発揮

レッグカールマシン(Universal 社製)を用いて伸張性膝関節屈曲筋力発揮を行った(図 2)。負荷は、1RM 測定の結果得られた重量に対し 20%、40%、60%、80%及び 100%の、計 5 段階を設定した。本研究におけるレッグカールの試行では、被験者に伸張性収縮のみを行わせた。はじめに被験者の膝関節角度がおおよそ 120° 屈曲位となる位置で検者がレバーアームを支えておき、その後に検者が力を加えるのを止めると同時に、被験者は伸張性の筋力発揮を行った。被験者には、メトロノームの音を目安に、伸張性収縮を 4 秒間で完遂するよう指示した。用いる負荷の順番は、検者が無作為に決定した。

II-3. 測定項目

II-3-1. 筋電図

表面筋電図法を用いて、エクササイズ中の両脚の大腿二頭筋長頭、半腱様筋、半膜様筋、腓腹筋内側頭の計 8 筋の筋電位を導出した。導出方法は双極誘導法、サンプリング頻度は 1000Hz とした。電極は、ディズポーザブル電極(レクトロード NP、アドバンス社製)を用い、電極間距離を 20mm とし貼付した。なお、貼付位置は Aldo(2003)の手法を参考にし、筋線維の走行に沿って貼付した。電極貼付に際しては、貼付位置をアルコール綿で拭き、電極間抵抗が $5k\Omega$ 以下となるようにした。また、上前腸骨棘に不関電極を貼付した。得られた筋電図信号は、テレメトリー式筋電計(MARQ、キッセイコムテック社製)により、パー

ソナルコンピュータ(LATITUDE D820、DELL 社製)に入力された。このデジタルデータを電気信号収録ソフトウェア(Vital Recorder2、キッセイコムテック社製)によりファイル化し、ハードディスクに保存した。

Ⅱ-3-2. 膝関節トルク

張力計(LTZ-100KA、共和電業社製)を用いて検出した張力と、被験者の下腿長から、各エクササイズ中の膝関節トルクを推定した。張力計に非伸縮素材のロープを介して既知重量を吊るし、得られた電気信号を用いて較正した。ノルディック・ハムストリングスでは、張力計をチェーンとアタッチメントを介して被験者の左右の足首に一つずつ連結し、被験者の足首を固定した(図 1)。あらかじめ被験者の下腿長を測定しておき、張力計から得られた測定データから、以下の式を用いて膝関節トルクを推定した。

$$\text{膝関節トルク(Nm)} = F(N) \times L(m)$$

ここで、 F は張力計の値(N)、 L は膝関節中心から外果までの距離(m)を表す。レッグカールでは、レッグカールマシンの負荷と連結したワイヤー部分に張力計を接続した。予備実験において、レッグカールマシンの足首用パッドに張力計を接続して牽引したときの値は、図 2 の連結部における張力計の値の 1.7 倍を示した。よって、以下の式を用いて膝関節トルクを推定した。

$$\text{膝関節トルク(Nm)} = kF(N) \times L(m)$$

ここで、係数 k は補正のための値である 1.7、 F は張力計の値(N)、 L は膝関節中心から外果までの距離(m)を表す。



図 1 張力計



図 2 レッグカールマシン

Ⅱ-3-3. 動作中の下肢関節角度

各エクササイズ中の関節角度を測定するために、ビデオカメラ(DCR-PC300、SONY社製)で被験者を右側方から撮影した。被験者の全身が映るように、被験者から 3m 離れた位置に 1.2m の高さでカメラを設置した。被験者の右側の肩峰、大転子、膝関節中心、外果、踵骨隆起、つま先にデジタル用マーカーを貼付した。また、トリガー用ランプ装置を A/D 変換カード(ADA16-32/2(CB)F、キッセイコムテック社製)に接続し、運動開始前に点滅させて、映像と筋電図を同期させた。カメラのフ

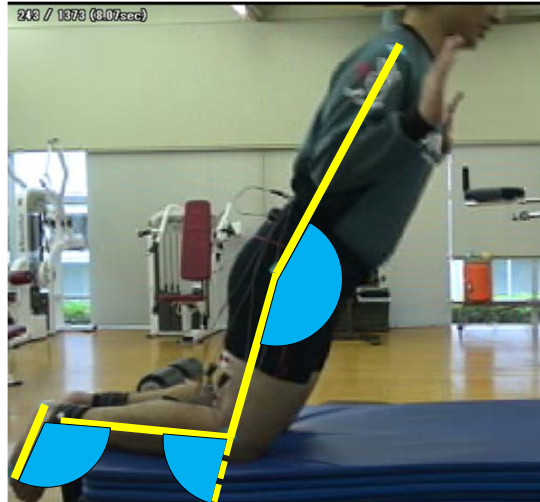


図 3 関節角度の測定

ームレートは 30fps とした。カメラの映像は動作解析ソフトウェア(Kine Analyzer、キッセイコムテック社製)を用いて動画ファイルとしてハードディスクに保存した。動作解析ソフトウェア(3D Calculator、キッセイコムテック社製)を用いて、得られた映像上で各マーカーをデジタル化し、肩峰、大転子、膝関節中心、外果、踵骨隆起、つま先の分析点の矢状面座標を読み取った。肩峰と大転子を結ぶ線分と、大転子と膝関節中心を結ぶ線分のなす角を、股関節角度として算出した。大転子と膝関節中心を結ぶ線分と、膝関節中心と外果を結ぶ線分のなす角を、膝関節角度として算出した。膝関節中心と外果を結ぶ線分と、踵骨隆起とつま先を結ぶ線分のなす角を、足関節角度として算出した(図 3)。

Ⅱ-3-4. レッグカールの最大挙上重量

レッグカールの最大挙上重量(one-repetition maximum : 1RM)の測定に際しては、十分に下肢のストレッチを行わせた後、被験者をレッグカールマシンに伏臥位にし、体重の 10% 以下の軽い負荷で練習を行った。膝関節を 90° 以上屈曲できた試技を成功とし、成功した場合には 10 ポンドずつ負荷重量を増やした。失敗した場合には、負荷重量を 10 ポンド減らし、5.5 ポンドの補助プレート(図 2)を追加し、再度測定をした。適切なテクニックで 1 回だけ挙上できる負荷を 1RM とした。被験者の疲労を考慮し、各試行間には十分な休息時間を設けた。

Ⅱ-4. 分析

膝関節屈曲と足関節底屈における最大随意収縮(Maximum Voluntary Contraction : MVC)時の筋放電量を測定した。被験者をストレッチ用マットの上に伏臥位にさせ、検者の徒手抵抗に対して最大努力での等尺性膝関節屈曲筋力発揮と等尺性足関節底屈筋力発揮を行わせた。等尺性膝関節屈曲筋力発揮にあたっては、足関節角度を 90° に保ち、膝関節角

度を 90° 、 70° 、 50° および 30° の 4 段階に設定した。膝関節角度 80° における MVC 時の筋放電量は、 90° と 70° における MVC 時の筋放電量の平均値を用い、 60° および 40° も同様に処理した。等尺性足関節底屈筋力発揮にあたっては、伏臥位で膝関節を伸展させ、足関節を 90° に保った状態で測定を行った。この測定値は、腓腹筋内側頭の筋放電量の分析にのみ用いた。筋力発揮時間は 3 秒間とした。筋電波形の分析にあたっては、得られた筋電図信号を全波整流した。MVC 発揮時の筋電位は、安定して得られた 0.5 秒間の二乗平均平方根(root mean square : RMS)値で表した。各試行間の筋放電量の比較には、MVC 発揮時の RMS 値を基準値として、各試行の RMS 値を基準値で除すことによる相対値を用いた(%MVC)。

張力計から得られた電気信号は、A/D 変換カード(ADA16-32/2(CB)F、キッセイコムテック社製)を介し、パーソナルコンピュータに入力された。このデジタルデータは電気信号収録ソフトウェア(Vital Recorder2、キッセイコムテック社製)によりファイル化され、ハードディスクに保存された。波形データに対し 3 点移動平均による平滑化を行った。なお、電気信号のサンプリング頻度は 1000Hz とした。

筋電図と膝関節トルクの分析にあたっては、膝関節角度を基準として局面分けを行った。膝関節角度が $95 - 85^{\circ}$ の区間を 90° 区間、 $85 - 75^{\circ}$ の区間を 80° 区間とし、以下同様に 30° 区間までの局面に分けた。

II-5. 統計処理

分析結果は、平均値±標準偏差で表した。平均値の差の比較には二元配置の分散分析を用いた。主効果が見られた場合、Bonferroni の多重比較検定を実施した。統計処理には統計解析ソフト(PASW Statistics18、SPSS 社製)を使用した。なお、危険率 5%未満($p<0.05$)をもって有意とした。

Ⅲ.結果

Ⅲ-1. 筋放電量

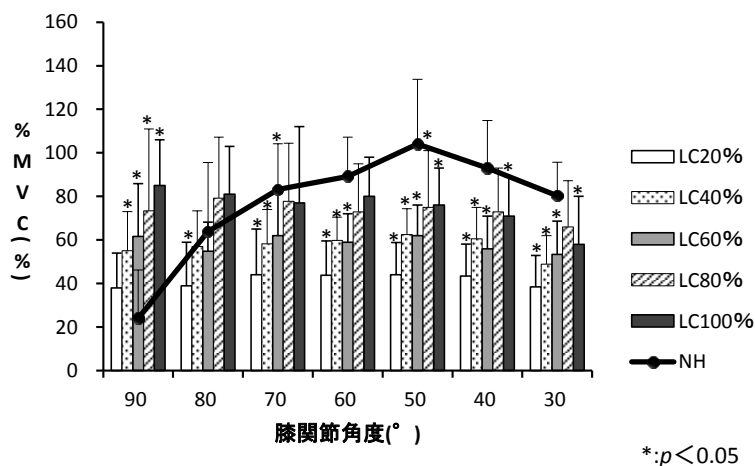


図 4 右大腿二頭筋長頭(R-BF)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p<0.05$)

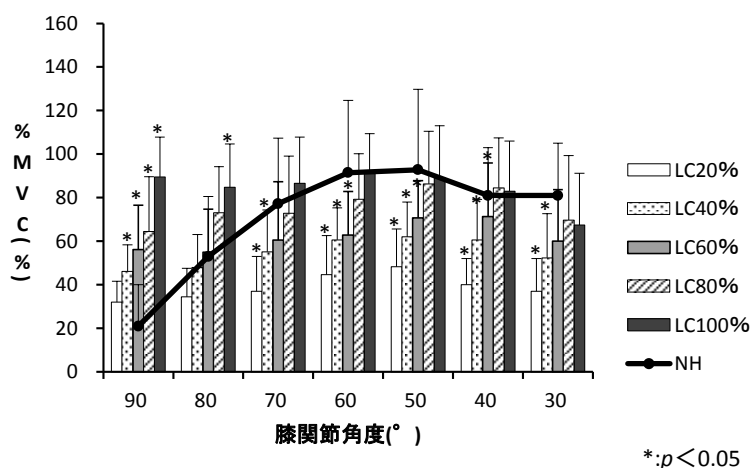
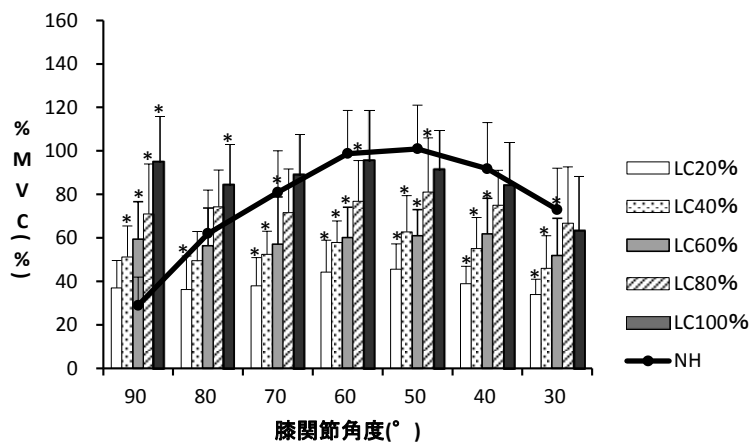


図 5 左大腿二頭筋長頭(L-BF)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p<0.05$)

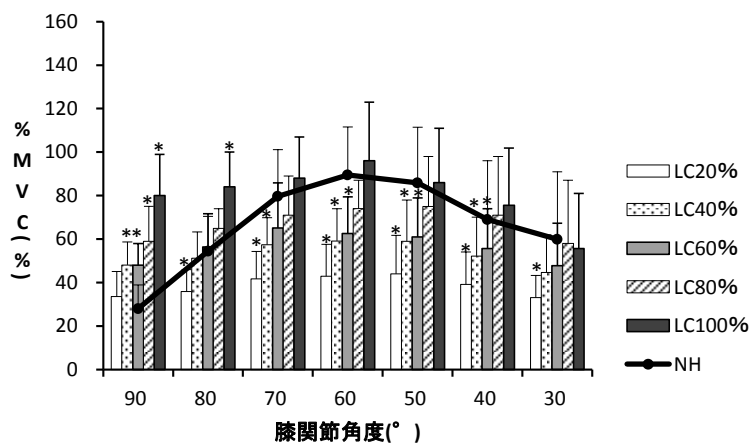
右側大腿二頭筋長頭(R-BF)と左側大腿二頭筋長頭(L-BF)の筋放電量を図 4 と図 5 に示す。R-BF における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $24.0 \pm 22.2\%MVC$ 、80° 区間では $63.9 \pm 31.7\%MVC$ 、70° 区間では $83.2 \pm 21.0\%MVC$ 、60° 区間では $89.2 \pm 18.0\%MVC$ 、50° 区間では $104.0 \pm 29.8\%MVC$ 、40° 区間では $93.0 \pm 21.8\%MVC$ 、30° 区間では $80.3 \pm 15.4\%MVC$ であった。L-BF における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $20.7 \pm 18.7\%MVC$ 、80° 区間では $53.0 \pm 27.6\%MVC$ 、70° 区間では $77.2 \pm 30.1\%MVC$ 、60° 区間では $91.5 \pm 33.1\%MVC$ 、50° 区間では $92.8 \pm 37.0\%MVC$ 、40° 区間では $80.7 \pm 21.8\%MVC$ 、30° 区間では $81.1 \pm 24.3\%MVC$ であった。



*: $p < 0.05$

図 6 右半膜様筋(R-SM)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)

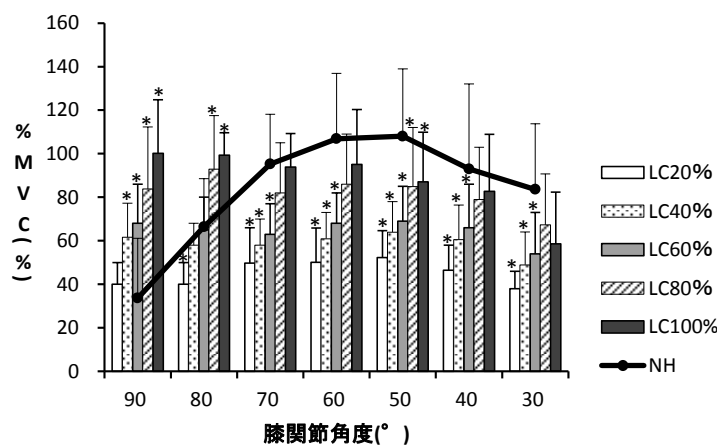


*: $p < 0.05$

図 7 左半膜様筋(L-SM)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)

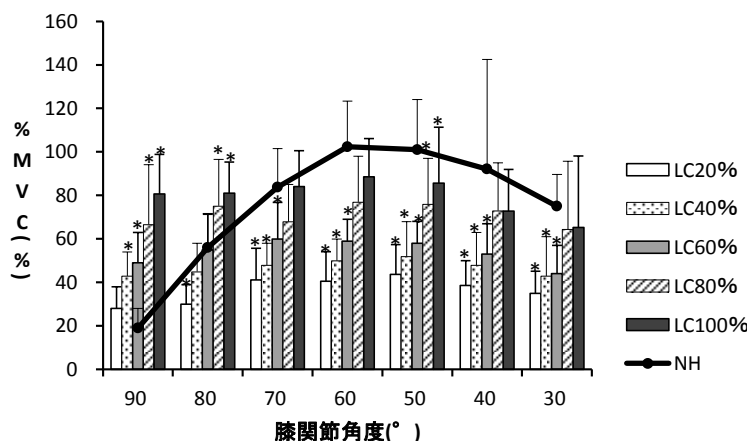
右側半膜様筋(R-SM)と左側半膜様筋(L-SM)の筋放電量を図 6 と図 7 に示す。R-SM における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $29.5 \pm 12.7\%MVC$ 、80° 区間では $61.8 \pm 19.6\%MVC$ 、70° 区間では $81.4 \pm 19.4\%MVC$ 、60° 区間では $98.7 \pm 19.8\%MVC$ 、50° 区間では $100.9 \pm 20.1\%MVC$ 、40° 区間では $91.8 \pm 21.2\%MVC$ 、30° 区間では $73.2 \pm 18.6\%MVC$ であった。L-SM における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $27.7 \pm 10.7\%MVC$ 、80° 区間では $54.5 \pm 16.0\%MVC$ 、70° 区間では $79.6 \pm 21.5\%MVC$ 、60° 区間では $89.5 \pm 22.0\%MVC$ 、50° 区間では $85.8 \pm 25.6\%MVC$ 、40° 区間では $68.9 \pm 26.6\%MVC$ 、30° 区間では $59.9 \pm 31.1\%MVC$ であった。



*: $p < 0.05$

図 8 右半腱様筋(R-ST)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)

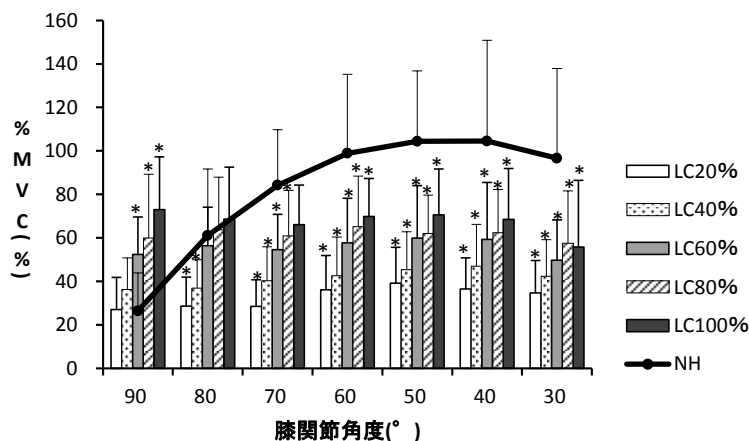


*: $p < 0.05$

図 9 左半腱様筋(L-ST)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)

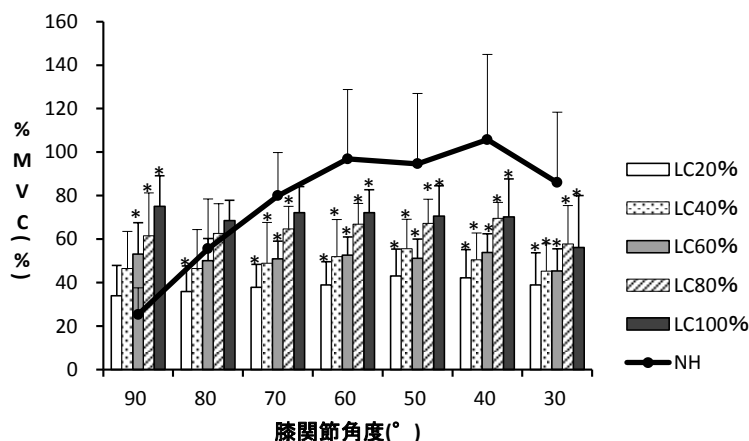
右側半腱様筋(R-ST)と左側半腱様筋(L-ST)の筋放電量を図 8 と図 9 に示す。R-ST における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $33.6 \pm 27.5\%MVC$ 、80° 区間では $66.5 \pm 22.0\%MVC$ 、70° 区間では $95.3 \pm 22.9\%MVC$ 、60° 区間では $106.9 \pm 30.0\%MVC$ 、50° 区間では $108.5 \pm 31.1\%MVC$ 、40° 区間では $92.7 \pm 38.7\%MVC$ 、30° 区間では $83.6 \pm 30.1\%MVC$ であった。L-ST における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $19.3 \pm 9.4\%MVC$ 、80° 区間では $56.0 \pm 15.7\%MVC$ 、70° 区間では $83.8 \pm 17.8\%MVC$ 、60° 区間では $102.3 \pm 21.0\%MVC$ 、50° 区間では $101.4 \pm 23.2\%MVC$ 、40° 区間では $92.1 \pm 50.4\%MVC$ 、30° 区間では $75.0 \pm 14.7\%MVC$ であった。



*: $p < 0.05$

図 10 右腓腹筋内側頭(R-MG)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)



*: $p < 0.05$

図 11 左腓腹筋内側頭(L-MG)の筋放電量

* : 各関節角度区間における NH と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p < 0.05$)

右側腓腹筋内側頭(R-MG)と左側腓腹筋内側頭(L-MG)の筋放電量を図 10 と図 11 に示す。R-MG における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $26.5 \pm 17.5\%MVC$ 、80° 区間では $61.1 \pm 30.6\%MVC$ 、70° 区間では $84.2 \pm 25.5\%MVC$ 、60° 区間では $98.9 \pm 36.4\%MVC$ 、50° 区間では $104.4 \pm 32.4\%MVC$ 、40° 区間では $104.5 \pm 46.3\%MVC$ 、30° 区間では $96.6 \pm 41.3\%MVC$ であった。L-MG における各角度区間での筋放電量は、90° 区間では $25.3 \pm 12.3\%MVC$ 、80° 区間では $55.6 \pm 22.8\%MVC$ 、70° 区間では $79.9 \pm 19.8\%MVC$ 、60° 区間では $96.8 \pm 32.0\%MVC$ 、50° 区間では $94.6 \pm 32.4\%MVC$ 、40° 区間では $105.7 \pm 39.2\%MVC$ 、30° 区間では $86.0 \pm 32.4\%MVC$ であった。

Ⅲ-2. 膝関節トルク

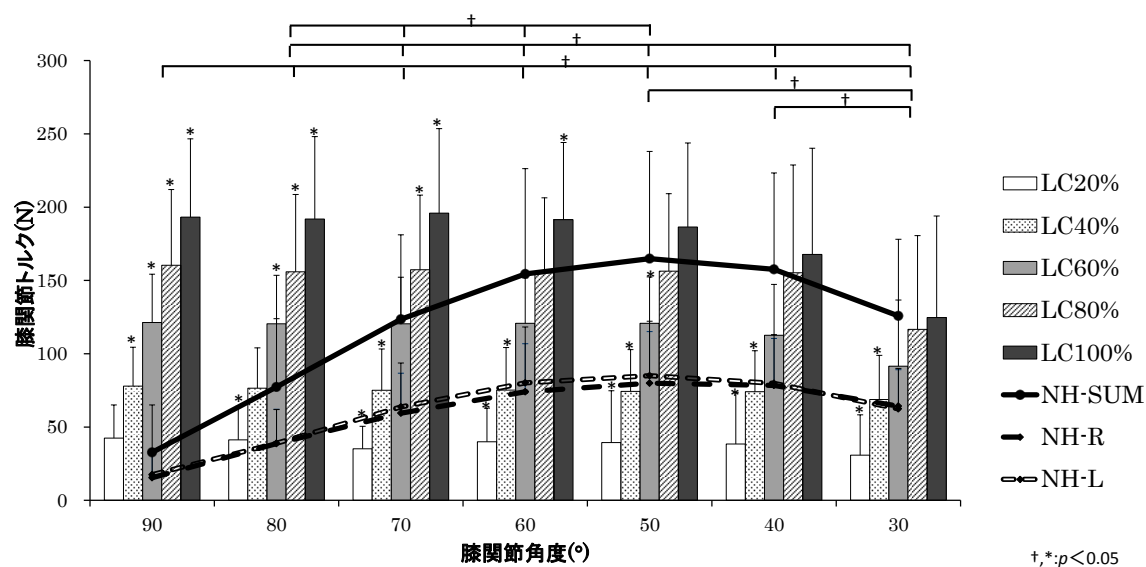


図 12 各エクササイズ中の膝関節トルク

† : NH-SUM の関節角度区間での比較($p<0.05$)

* : 各関節角度区間における NH-SUM と 20、40、60、80、100%1RM レッグカールとの比較($p<0.05$)

表 1 膝関節トルク(Nm)

	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
NH-SUM	32.7±32.4	77.3±46.6	123.5±57.6	154.4±71.9	164.9±73.2	157.6±65.8	125.9±52.2
NH-R	15.4±17.2	38.7±23.5	59.4±27.3	74.0±32.8	80.0±35.2	78.4±32.1	64.3±24.9
NH-L	17.5±15.4	38.9±23.0	63.7±30.0	80.1±38.2	85.0±37.2	79.8±33.2	62.4±27.6
LC20%	42.4±22.7	41.3±22.8	35.1±15.3	40.0±23.0	39.4±35.3	38.5±35.2	30.8±27.6
LC40%	77.9±26.5	76.4±27.5	75.1±28.1	75.2±29.1	74.3±28.4	74.1±27.9	68.8±30.0
LC60%	121.3±33.0	120.5±33.1	120.4±31.7	120.8±30.9	120.7±31.7	112.7±34.7	91.5±45.1
LC80%	160.3±51.6	155.8±52.8	157.3±50.8	155.2±51.1	156.3±52.8	155.2±73.4	116.6±63.9
LC100%	193.2±53.5	191.9±56.2	195.9±50.8	191.4±52.7	186.4±57.3	167.8±72.5	124.7±69.3

各エクササイズ中に発揮された膝関節トルクを図 12 と表 1 に示す。ノルディック・ハムストリングスの試行において、右脚と左脚が発揮した膝関節トルクをそれぞれ NH-R、NH-L とし、その和を NH-SUM とした。

ノルディック・ハムストリングスでは、エクササイズの開始姿勢である膝立ち位から、上体を前方に移動させるにつれてトルクが増加していき、膝関節 50° 付近をピークとして、その後は減少した。NH-SUM の各角度区間でのトルクは、90° 区間では 32.7±32.4Nm、80° 区間では 77.3±46.6Nm、70° 区間では 123.5±57.6Nm、60° 区間では 154.4±71.9Nm、50° 区間では 164.9±73.2Nm、40° 区間では 157.6±65.8Nm、30° 区間では 125.9±52.2Nm を示した。

NH-SUM の平均値の差を関節角度間で比較すると、90° 区間の値は 80°、70°、60°、50°、40°、30° 区間と有意差が見られた。80° 区間の値は 90°、70°、60°、50°、

40°、30° 区間と有意差が見られた。70° 区間の値は、90°、80°、60°、50°、40° 区間と有意差が見られた。60° 区間の値は、90°、80°、70° 区間と有意差が見られた。50° 区間の値は、90°、80°、70°、30° 区間と有意差が見られた。40° 区間の値は、90°、80°、70°、30° 区間と有意差が見られた。30° 区間の値は、90°、80°、50°、40° 区間と有意差が見られた。

NH-R と NH-L の平均値の差を比較したが、有意差は見られなかった。

NH-SUM と 20%、40%、60%、80%、100%1RM のレッグカールの試行間で、平均値の差を比較した。90° 区間では、40%、60%、80%、100%1RM と有意差が見られた。80° 区間では、20%、60%、80%、100%1RM と有意差が見られた。70° 区間では、20%、40%、80%、100%1RM と有意差が見られた。60° 区間では、20%、40%、100%1RM と有意差が見られた。50° 区間では、20%、40%、60%1RM と有意差が見られた。40° 区間では、20%、40%1RM と有意差が見られた。30° 区間では、20%、40%1RM と有意差が見られた。

IV. 考察

IV-1. 筋放電量

本研究では、ノルディック・ハムストリングスの試行を膝関節角度 10° ごとに局面分けした。エクササイズを安全に処方するためには、筋放電量がピークを示す局面を把握しておくことが必要であると考えられる。筋放電量を測定した結果、R-BF、L-BF、R-SM、R-ST、L-ST では膝関節角度 50° 区間、R-MG、L-MG では 40° 区間、L-SM では 60° 区間で%MVC 値がピークを示した(図 4 - 11)。

岩下ら(2009)の報告によると、ノルディック・ハムストリングスを行った時の筋放電量のうち、BF、ST は膝関節角度 $70-60^{\circ}$ でピークを示し、MG は $60-50^{\circ}$ でピークを示した。この結果と本研究の結果を比較すると、本研究において筋放電量のピークが出現する膝関節角度がより伸展位にあることがわかる。この要因の一つとして、膝関節角度の定義の違いが挙げられる。本研究では膝関節角度を、大転子と膝関節中心を結ぶ線分と、膝関節中心と外果を結ぶ線分とのなす角とした。一方、岩下らは電気角度計を膝関節に装着していたが、詳細な装着部位について記載していない。つまり、膝関節角度の定義の違いによって、筋放電量のピークが出現する角度に差異が見られた可能性がある。他の要因として、本研究に参加した被験者の膝屈曲筋力が、岩下らの被験者の膝屈曲筋力よりも高い可能性が考えられる。ノルディック・ハムストリングスにおける筋放電量は、図 4 のように試行の開始から終了まで山なりの折れ線を描くが、筋放電量がピークを示してから減少する局面は、被験者が負荷に耐えきれなくなり、急激に膝関節が伸展する局面に対応している。膝屈曲筋力が高ければ、膝関節が伸展しても負荷に耐えることができるため、筋放電量のピークが出現する角度がより伸展位に遷移する。ただし、本研究では被験者のレッグカールにおける最大拳上重量を測定したのに対し、岩下らの研究においては膝屈曲筋力を測定していないので、両被験者群の筋力差について比較することはできない。

IV-2. 膝関節トルク

ノルディック・ハムストリングスの 90° 区間での膝関節トルクはわずか $32.7 \pm 32.4 \text{Nm}$ であるが、膝関節が伸展するにつれてトルクは増加していき、 50° 区間でピーク値の $164.9 \pm 73.2 \text{Nm}$ を示す(図 12)。その後、トルクは 40° 区間から 30° 区間にかけて有意に減少した。

本研究では動作の規定として、4 秒間でノルディック・ハムストリングスの動作を完遂させるよう被験者に指示した。しかし被験者の動作を観察していると、膝関節の伸展に伴う負荷の増加に耐えられなくなり、ある角度を境に急激に膝関節が伸展する様子が確認された。図 12 の $50-30^{\circ}$ 区間に見られる NH-SUM のトルクの減少は、この動作を反映したものと考えられる。筋にかかる張力の増加に伴ってゴルジ腱器官の活動が活性化すると、 α 運動ニューロンが抑制され、収縮していた筋が弛緩し、これによって筋と結合組織が過剰な負荷から保護される(Kent, 2006)。ノルディック・ハムストリングスの実施時に一般的

に見られる被験者の脱力の局面は、ゴルジ腱器官が活性化し、ハムストリングスの活動が抑制された状況であると考えられる。これに関連して、ウェイトリフターやボディビルダーはときとして、脱抑制トレーニングを行う場合がある(Kent, 2006)。脱抑制トレーニングとは、筋長変化の大きいもしくは爆発的な動きをすることでゴルジ腱器官による抑制を取り除き、筋力増強効果を高めるものである(Kent, 2006)。ノルディック・ハムストリングスが 100%1RM のレッグカールと同程度、あるいはそれ以上の筋力発揮を必要とするのであれば、脱抑制トレーニングのためのエクササイズとして取り入れることが可能だろう。

IV-3. 肉離れ予防のエクササイズとしてのノルディック・ハムストリングス

表 2 NH と同程度の筋放電量を示すレッグカールの負荷

		90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
BF	R	20%	40%,60% 80%,100%	80%,100%	80%,100%	↑	80%	80%
	L	20%	20%,40% 60%,80%	60%,80% 100%	80%,100%	80%,100%	80%,100%	60%,80% 100%
SM	R	20%	40%,60% 80%	80%,100%	100%	100%	80%,100%	80%,100%
	L	20%	40%,60% 80%	60%,80% 100%	80%,100%	80%,100%	80%,100%	40%,60% 80%100%
ST	R	20%	40%,60%	80%,100%	80%,100%	↑	80%,100%	80%,100%
	L	20%	40%,60%	80%,100%	100%	↑	80%,100%	80%,100%
MG	R	20%,40%	60%,80% 100%	100%	↑	↑	↑	↑
	L	20%,40%	40%,60% 80%,100%	100%	↑	↑	↑	↑

図 4～図 11 の各角度区間において、NH の筋放電量と有意差を示さないレッグカールの試行を、同程度の筋放電量であると判断した。↑は、NH の筋放電量が 100%1RM のレッグカールの筋放電量より有意に高いことを示す。

図 4～図 11 の各角度区間において、NH の筋放電量と比較して有意差の見られなかったレッグカールの試行を表 2 に示した。ノルディック・ハムストリングスにおける筋放電量は、開始直後の 90° 区間ではレッグカールの 20－40%1RM に相当する。その後、筋放電量は増加し、80° 区間で 100%1RM に相当する筋も見られる。筋放電量は、ピーク値出現以後エクササイズの終盤に減少したが、80%1RM 程度に相当する筋活動水準は維持されている。特に R-MG と L-MG においては、60° 区間以降、100%1RM よりも有意に高い筋放電量を示した。腓腹筋の筋放電量は、膝伸展域において高くなることが報告されており(亀田ら, 2001)、ノルディック・ハムストリングスにおいても、エクササイズ後半の膝伸展域において腓腹筋が高い水準で動員されることが示唆された。また、R-BF、R-ST および L-ST の 50° 区間でも、100%1RM より有意に高い筋放電量を示した。このことから、ハムスト

リングスのみでは賄いきれなくなった 100%1RM を上回る運動強度に対して、ハムストリングスの筋力を補う形で腓腹筋が動員されたことが推測される。

表 3 NH-SUM と同程度のトルクを示すレッグカールの負荷

	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
NH-SUM	20%	40%	60%	60% 80%	80% 100%	60% 80% 100%	60% 80% 100%

図 12 の各角度区間において、NH-SUM の膝関節トルクと有意差を示さないレッグカールの試行を、同程度のトルクであると判断した。

図 12 の各角度区間において、NH-SUM のトルクと比較して有意差の見られなかったレッグカールの試行を表 3 に示した。ノルディック・ハムストリングスとレッグカールの膝関節トルクを比較すると、90° 区間で 20%1RM 程度であったが、その後運動強度が増加し、50° 区間では 80–100%1RM に相当していた。レッグカールの 1RM 測定の結果は、エクササイズの短縮性局面で発揮された筋力を反映している。筋力発揮の力-速度関係を考慮すると、ノルディック・ハムストリングスは伸張性のエクササイズであるため、1RM より大きな筋力を発揮することは十分に考えられる。ノルディック・ハムストリングスは運動強度の高いエクササイズであることから、ハムストリングスの傷害からの回復過程にある者にとっては危険であり、不向きであるとも考えられる。また、本研究では運動習慣のある被験者を対象としたが、そのほとんどがノルディック・ハムストリングスを初めて実施したため、主観的にも高い運動強度であると感じたことが推測される。ノルディック・ハムストリングスの運動強度を軽減させるための手法として、ベンチやスタビリティボールを前方に置き、最後に両手が接地する地点を変更する手法や、厚手のレジスタンスバンドを腰または胴に巻きつけ、パートナーに上から牽引させることで補助してもらう手法が紹介されており (Brumitt, 2007)、このエクササイズを初めて導入する過程で採用できるだろう。

先行研究により、大腿四頭筋に対するハムストリングスの筋力比が高値であると、ハムストリングスの肉離れの発生率が低いことが示されている (Burkett, 1970 ; Heiser ら, 1984 ; Orchard ら, 1997 ; Yamamoto, 1993)。したがって、肉離れを予防するためのエクササイズを選択する際に、ハムストリングスに特異的な筋力増加をもたらすものを選択する必要がある。筋力を向上させるための運動強度は、初心者の場合 40–45%1RM (Beacle, 2000)、熟練者の場合 80%1RM 以上 (Hakkinen, 1985) が必要だといわれている。表 2 と表 3 の結果は、ノルディック・ハムストリングスが可動域全体に渡り、ハムストリングスの筋力向上をもたらすエクササイズであることを支持するものといえる。また、ノルディック・ハムストリングスは伸張性の筋力発揮を伴うことから、mechanotransduction のプロセス

を通して(Khan ら, 2009)、大きな張力に対する筋と腱の耐性を示すと考えられる。ノルディック・ハムストリングスがハムストリングスの肉離れの予防に有効であることはすでに述べられているが、本研究によって明らかになった高い運動強度は、肉離れの予防法としての有効性を支持するものといえる。

IV-4. 筋力発揮の左右差

本研究において、ノルディック・ハムストリングス中に発揮される膝関節トルクに左右差は見られなかった(図 12)。肉離れの発生要因の一つとして、筋力の左右でのアンバランスが挙げられるため(Heiser ら, 1984 ; Orchard ら, 1997 ; Yamamoto, 1993)、肉離れの予防を目的としてエクササイズを処方する際には、左右均等な筋力発揮を伴うものが好ましい。この点を考慮すると、ノルディック・ハムストリングスにおいて左右均等な膝屈曲筋力発揮を伴っていたことから、ノルディック・ハムストリングスは左右の筋力アンバランスを生じにくいエクササイズであることが示唆される。しかし、膝屈曲には複数の筋活動が関与するため、個々の筋に課される負荷の大きさを明らかにすることが望ましい。本研究では、両脚の大腿二頭筋長頭(BF)、半膜様筋(SM)、半腱様筋(ST)および腓腹筋内側頭(MG)、計 8 筋から筋電位を導出した。各筋における筋活動を左右で比較したところ、R-MG と L-MG で交互作用がみられるなど、筋活動においては左右均等ではなかった。このことからノルディック・ハムストリングスは、トルクとして観察される値に左右差は見られなくとも、個々の筋では左右不均等な活動を生じるエクササイズであることが示唆された。これを支持する研究として、Clark ら(2005)は、4 週間のノルディック・ハムストリングスを用いたトレーニング後に、左右のトルクに不均衡が増大したことを報告している。この研究ではトレーニング前の膝屈曲最大トルクの出現する角度が、利き脚では 36.8°、非利き脚では 28.2° で、8.6° (30.3%)の差を示していた。しかし、4 週間のトレーニング後では利き脚で 30.8°、非利き脚で 21.6° と、その差が 9.2° (42.4%)に広がった。このことから、ノルディック・ハムストリングスでは一方の脚により大きな負荷がかかる可能性が否定できない。前述したように、肉離れの予防を目的としてエクササイズを処方する際には、左右均等な筋力発揮を伴うものが好ましい。よって、ノルディック・ハムストリングスの処方に加え、定期的に筋力測定を行うことで左右差の変化を観測し、左右差の増大が認められた際には、一側性のエクササイズを追加することで左右の不均衡を解消していくことが望ましいと考えられる。

V. 結論

ノルディック・ハムストリングスは、筋力向上によってハムストリングスの肉離れの予防が望めるエクササイズである。

VI. 参考文献

- Agre, J. C. (1985)Hamstring injuries. Proposed aetiological factors, prevention, and treatment. *Sports Med* 2 : 21-33.
- Aldo, O. P. : 栢森良二訳(2003)筋電図のための解剖ガイド. 西村書店 : 新潟, p142-143, 166-167, 180-183.
- 荒木恵(2009)ノルディック・ハムストリングの筋放電特性. *体力科学* 56(2) : 298.
- Baechele, T. R. , Earle, R. W. , and Wathen, D. (2000)Resistance training. In *essentials of strength training and conditioning*, edited by Baechele, T. R. and Earle, R. W. , 2nd ed : 395-425.
- Bahr, R. , Mæhlum, S. (2002)Idrettsskader. Oslo : Gazette Bok : 53.
- Brockett, C. L. , Morgan, D. L. , and Proske, U. (2004)Predicting hamstring strain injury in elite athletes. *Med Sci Sports Exerc* 36 : 379-387.
- Brughell, M. , Cronin, J. (2008)Preventing hamstrings injuries in sport. *Strength and Conditioning Journal* 30(1) : 55-64.
- Brumitt, J. (2007)Eccentric Training to Reduce Hamstring Injuries in Sprinters. *NCSA's Performance Training Journal* 6(3) : 8-11.
- Burkett, L. N. (1970)Causative factors in hamstring strains. *Med Sci Sports Exerc* 2 : 39-42.
- Burnett, A. F. , Coleman, J. L. , Jemma, L. C. , and Netto, K. J. (2008)An electromyographic comparison of neck conditioning exercises in healthy controls. *Journal of Strength and Conditioning Research* 22(2) : 447-454.
- Clark, R. , Bryant, A. , Culgan, J. P. , and Hartley, B. (2005)The effects of eccentric hamstring strength training on dynamic jumping performance and isokinetic strength parameters : a pilot study on the implications for the prevention of hamstring injuries. *Physical Therapy in Sport* 6 : 67-73.
- Comfort, P. , Green, C. M. , and Matthews, M. (2009)Training considerations after hamstring injury in athletes. *Strength and Conditioning Journal* 31(1) : 68-74.
- Devlin, L. (2000)Recurrent posterior thigh symptoms detrimental to performance in rugby union. *Sports Med* 2 : 21-33.
- Enoka, R. M. (1994)Neural adaptations with chronic physical activity. *Journal of Biomechanics* 30(5) : 447-455.
- 深谷茂・高澤晴夫(1979)肉離れの臨床研究. *整形外科* 30 : 691-697.
- Hakkinen, K. , Alen, M. , and Komi, P. V. (1985)Changes in isometric force-and relaxation time,electromyographic and muscle fiber characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiologica Scandinavica* 125 : 573-585.

Heiser, T. M. , Weber, J. , and Sullivan, G. (1984) Prophylaxis and management of hamstring muscle injuries in intercollegiate football players. *Am J Sports Med* 12 : 71-76, 368-370.

平澤泰助・麻生伸一(1994)スポーツにおける軟部組織の外傷と障害—筋および靱帯の損傷を中心に. *整形外科* 45 : 1287-1293.

岩下篤司・岩川卓志(2009)ノルディックハムストリングスエクササイズにおける下肢筋の筋電図学的分析. *四条畷学園大学リハビリテーション学部紀要* 5 : 11-16.

蒲田和芳(2000)肉離れの評価とリハビリテーション. *臨床スポーツ医学* 17 : 687-694.

亀田修一・市橋則明(2001)膝および足関節角度が足関節底屈トルクと下腿三頭筋の筋活動に及ぼす影響について. *理学療法学* 28 : 111.

Khan K. M. , Scott, A. (2009) Mechanotherapy : How physical therapists' prescription of exercise promotes tissue repair. *Br J Sports Med* 43 : 247-251.

木村護郎・今野宏亮・徳元仁美・松原由未子・栗井瞳・佐々木誠(2004)大腿四頭筋ならびに内・外側ハムストリングの筋力比と大腿部肉離れの発生との関係. *理学療法学* 19(4) : 323-329.

小林万壽夫・覚張秀樹・金久博昭・青山利春・角田直也(2009)ハムストリングス肉離れの経験を持つ陸上競技選手の短距離疾走時における大腿部の筋活動特性—健側と患側の差異— . *体力科学* 58 : 81-90.

Kujala, U. M. , Orava, S. , and Jarvinen, M. (1997) Hamstring injuries : current trends in treatment and prevention. *Sports Med* 23 : 397-404.

Lepainen, L. , Sarimo, J. , Mattila, K. , Heikkila, J. , and Orava, S. (2007) Distal tears of the hamstring muscle : review of the literature and our results of surgical treatment. *Br J Sports Med* 41 : 80-83.

Liemohn, W. (1978) Factors related to hamstring strains. *J Sports Med* : 71-76.

Lorenz, D. (2010) Eccentric interventions for tendinopathies. *Strength and Conditioning Journal* 32(2) : 90-98.

Mjølunes, R. , Arnason, A. , Østhagen, T. , Raastad, T. , and Bahr, R. (2004) A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scand Med Sci Sports* 14 : 311-317.

Orchard, J. (2001) Intrinsic and extrinsic risk factors for muscle strains in Australian football. *Am J Sports Med* 29 : 300-303.

Orchard, J. , Marsden, J. , and Lord, S. (1997) Preseason hamstring muscle weakness associated with hamstring muscle injury in Australian footballers. *Am J Sports Med* 25 : 81-85.

高澤晴夫(1967)肉離れ 200 例の経験. *災害医学* 5(10) : 750-757.

武田寧(2000)スポーツ損傷としての肉離れの疫学的調査. *臨床スポーツ医学* 17(6) : 665-669.

Verrall, G. M. , Slavotinek, J. P. , and Barnes, P. G. (2001)Clinical risk factors for hamstring muscle strain injury. Br J Sports Med35 : 435-440.

Yamamoto, T. (1993)Relationship between hamstring strains and leg muscle strength. J Sports Med Phys Fitness 33 : 194-199.

横江清司(1996)下肢の肉離れ. 保健の科学 38 : 441-445.

謝辞

本研究は、岡田純一准教授のご指導の下実施されました。岡田准教授には、研究のアイデアから論文執筆に渡って終始丁寧なご指導を賜り、感謝しております。

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご協力頂きました。金岡恒治准教授は、快く副査を引き受けてくださるとともに、激励してくださいました。杉崎範英助教には、副査を引き受けてくださるとともに、お忙しい中にも関わらずご指導のために定期的に多大なる時間を割いて頂きました。研究の難しさを実感すると同時に、研究の奥深さと楽しさを知ることができました。また、本研究室の荒井進之介君、関根悠太君、穴戸清恵さんには、様々な面で助けを頂きました。皆さんのおかげで、楽しい大学院生活を送ることができました。実験の協力を快く引き受けてくださった被験者の皆さんにも感謝致します。

最後に、大学院まで送り出してくれた家族に感謝致します。