

原 著

膝関節屈曲運動中のハムストリング筋活動と膝関節回旋運動の関係

青木信裕, 片寄正樹

札幌医科大学保健医療学部理学療法学科

本研究の目的は、等尺性膝関節屈曲運動中の膝関節屈筋群の筋活動量と膝関節回旋角度の関係を明らかにすることとした。13名の健康な成人男性が本研究に参加した。被験者は腹臥位、膝関節屈曲90°位で膝関節屈筋の最大等尺性収縮課題と漸増出力課題を実施した。運動課題中の表面筋電図と膝関節回旋角度を計測し、得られた筋電図データから筋電図積分値を算出した。表面筋電図は、半腱様筋 (ST)、半膜様筋 (SM)、大腿二頭筋長頭 (BF) から計測した。その後、膝関節回旋角度と各筋の筋電図積分値比について相関係数を求めた。その結果、膝関節外旋角度は筋電図積分値のBF/ST比、BF/SM比と有意な負の相関があった。この結果から、等尺性膝関節屈曲運動中の内側ハムストリングに対する外側ハムストリングの筋電図積分値比が高くなると、膝関節は内旋することが明らかとなった。このことから、内側および外側ハムストリングの筋機能は、膝関節屈曲90°位での膝関節回旋角度の評価によって推測することができる可能性がある。

キーワード：ハムストリング、膝関節、表面筋電図、筋機能、膝関節回旋

Correlation between the muscle activity ratio of the hamstrings and the knee rotation angle during isometric knee flexion

Nobuhiro AOKI, Masaki KATAYOSE

Second Division of Physical Therapy, School of Health Sciences, Sapporo Medical University

The purpose of this study was to elucidate the relationship between knee flexor muscle activity and knee rotation angle during isometric knee flexion. Thirteen healthy young men participated in this study. Subjects performed a maximum voluntary contraction (MVC) task of the knee flexors and a ramp up force task at 90° flexion in the prone position. Surface electromyography (EMG) mounted the right semitendinosus muscle (ST), the semimembranosus muscle (SM), and the long head of the biceps femoris muscle (BF) recorded and the knee rotation angle were recorded during MVC and ramp up tasks. The integrated EMG (iEMG) values were calculated from the EMG signals. The correlation coefficient between the knee joint rotation angle and iEMG ratio of each muscle was calculated. The knee external rotation angle was significantly and negatively correlated with the iEMG ratio of the BF to ST and BF to SM. These results indicated that the knee medial rotation angle increases when the ratio of lateral to medial hamstring's iEMG increases. These results suggested that the function of the medial and lateral hamstring can be estimated by evaluating the knee rotation angle during knee flexion at 90°.

Key words : hamstring muscle, knee joint, electromyography, muscle function, rotation at the knee joint

Sapporo J. Health Sci. 8:21-26(2019)

DOI:10.15114/sjhs.8.21

I. 緒 言

ハムストリングは半腱様筋 (ST), 半膜様筋 (SM), 大腿二頭筋長頭 (BF) および短頭から構成され, その作用は股関節伸展, 膝関節屈曲とされている. ハムストリングの形態やモーメントアームに関する報告では, 筋線維長や羽状角, モーメントアームは, それぞれの筋により異なることが示されている¹⁻⁴⁾. 更に, ハムストリングは大腿骨と脛骨の軸回旋である膝関節回旋運動にも関与しており, 各筋の起始・停止から決定される解剖学的な走行から, 内側ハムストリングである半腱様筋と半膜様筋は膝関節内旋, 外側ハムストリングである大腿二頭筋は膝関節外旋の作用を有するとされている⁵⁾. 膝関節回旋運動に対するハムストリング各筋の作用については, モーメントアームの計測^{3, 6)}や, 筋電図を用いた報告^{7, 8)}がされている. 各筋の筋機能を明らかにするために行われた筋電図学的研究としては, 膝関節回旋角度が異なる肢位で膝関節屈曲運動したときの各筋の筋活動量を計測し, ハムストリング各筋の作用について明らかにしている.

その一方で, 実際の膝関節屈曲運動を観察すると, 対象者が膝関節屈曲運動を実施している最中に膝関節回旋運動が生じていることを観察することができる. このときに生じる膝関節回旋運動は, 対象者が随意的に行っている運動ではなく, 不随意に生じているものである. また, 各対象者で膝関節回旋運動の程度や生じるタイミングは様々である. ハムストリングが有する膝関節回旋作用を考慮すると, 膝関節内旋運動が生じているときは内側ハムストリング, 膝関節外旋運動が生じているときは外側ハムストリングが強く働いていることが推測される. しかし, これまでの報告では膝関節回旋肢位を固定した状態で膝関節屈曲運動を行った際の筋機能について検討しており, 膝関節回旋運動を制限せずに膝関節屈曲運動を行うときのハムストリングの収縮動態については明らかではない. 随意的な膝関節屈曲運動中の膝関節回旋運動を評価することでハムストリングの収縮動態を推測することができれば, 理学療法場面で患者の関節運動からハムストリングの筋機能を個別に評価できる新規的な方法となる可能性がある.

そこで, 本研究の目的は, 等尺性収縮課題を用いて, 膝関節屈曲運動中に生じる膝関節回旋運動とハムストリング各筋の筋活動量の関係を明らかにすることを目的とした. 本研究では, 理学療法場面で簡易的に解釈することができる二次元画像を用いた膝関節回旋運動に着目して実施した. 本研究の仮説は, 膝関節回旋運動が自由に行われる状態で膝関節屈曲運動を行うと, 内側ハムストリングの筋活動量が高値のときには膝関節内旋し, 外側ハムストリングの筋活動量が高値のときには膝関節外旋するとした.

II. 方 法

1. 対象

対象は健康な成人男性13名 (21-29歳, 平均年齢23.3±2.5歳) とした. 被験者は下肢に関連する神経学的・整形外科的疾患の既往がない者とし, 測定実施時に疼痛の訴えないものとした. 全ての被験者の利き脚は右利きであり, 本研究では右下肢を対象側として測定を実施した. 被験者には, 事前に研究目的や測定内容等を明記した書面を用いて十分な説明を行った. その上で, 被験者より同意の得られた場合のみ測定を開始した. 本研究は札幌医科大学倫理委員会一般研究倫理審査委員会の承認を受け実施した (承認番号27-2-27).

2. 運動課題

運動課題は, 等尺性膝関節屈曲運動の最大随意収縮 (Maximum Voluntary Contraction; 以下MVC) 課題と漸増出力課題とした. 測定肢位は, 両課題ともに腹臥位で股関節屈曲0°, 膝関節屈曲90°とした. 運動課題時の膝屈曲トルクは, 等速性筋力測定機器 (Biodex system 3, Biodex社) を用いて測定した. このとき, ダイナモメータの回転軸が被験者の右膝関節屈曲・伸展運動軸と合うように調整した. 膝関節屈曲時に股関節での運動の影響を排除するために, 固定ストラップを用いて骨盤を固定した. また, 膝関節屈曲トルクを計測するために, ダイナモメータに接続したアタッチメントを下腿遠位部に固定した. 下腿遠位部の固定については, MVC課題では膝関節回旋運動を生じさせないためにアタッチメントと下腿をしっかりと固定したが, 漸増出力課題においては膝関節屈曲運動中の膝関節回旋運動を妨げないようにアタッチメントから下腿が外れない程度の強度で固定した.

課題実施前に膝関節屈曲の等尺性収縮を十分に練習した後, 運動課題を実施した. MVC課題は, 3秒間の最大随意収縮を3回実施し, 得られた最大膝関節屈曲トルクの平均値を代表値とした. 漸増出力課題は, まず膝関節屈曲トルクを発揮する際に目標となるトルク波形の設定を行った. 目標となるトルク波形は, MVC課題で得られた最大膝屈曲トルクを基準として, 毎秒20%MVCずつトルクを増加させて最大トルク発揮に至るように設定した. 対象者は, 前方に設置したモニタに表示された目標トルク波形と発揮トルク波形をリアルタイムに観察しながら, 発揮する膝関節トルクを漸増させる課題を行った. 運動課題の実施による疲労の影響を排除するために, 各試行間の休憩を2分間とした.

3. 膝関節回旋角度の測定

膝関節回旋角度の測定として, パーソナルコンピュータに接続したウェブカメラ (C310, logicool社) を用いて, 等

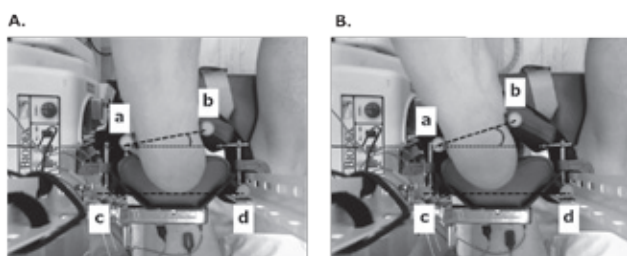


図1 膝関節回旋角度の測定

足底面からのカメラ映像から膝関節回旋角度を算出した。
直線ab: 外側・内側マーカーを結んだ直線
直線cd: アタッチメントに取り付けた水平線の指標
A: 収縮開始前
B: 漸増出力課題中

尺性膝関節屈曲運動中の膝関節回旋運動を足底面から撮影した(図1)。ウェブカメラのサンプリング周波数は33 Hzであった。撮影後に膝関節回旋角度を算出するために、内果および外果から足底面に下ろした垂線が足底面と接する部位にマーカーを貼付した。撮影した画像は動画解析ソフト(Kinovea 0.8.15, Kinovea社)に取り込み、画像内のマーカーの位置座標を計測した。計測したマーカー座標から内側マーカーと外側マーカーを結ぶ直線を求め、逆三角関数を用いて直線が水平線と成す角度を算出することで、膝関節回旋角度を算出した。

4. 表面筋電図の測定

表面筋電図の測定は能動電極(DE-2.1, Delsys社)を用いた表面筋電計(Bagnoli System, Delsys社)を使用して実施した。被験筋はST, SM, BFとした。各筋の電極貼付部位は、STが坐骨結節から膝窩部の半腱様筋腱の近位1/3の筋腹部、SMはST腱内側の筋腹部、BFは坐骨結節から腓骨頭の1/2の筋腹部と規定した。電極貼付の手順として、各筋を触診により同定して電極貼付部位を規定した後で、超音波画像診断装置を用いて筋腹を同定した上で貼付した。特にSTの設置においては、STの筋腹中央に位置する腱画上に電極を設置すると筋電図信号に影響を及ぼす可能性がある。それを避けるために、超音波画像診断装置を用いて腱画の位置を同定し、STの筋電図電極が腱画よりも近位部になるように決定した。

電極貼付部位は剃毛を行い、アルコール綿で皮脂を取り除き、皮膚研磨剤で前処理した。その後、各筋で推定される筋線維の走行に沿って電極を貼付した。電極貼り付け後、測定中の交流雑音の混入を小さくするために、安静時の電位が $50\mu\text{V}$ 以下となっていることを確認した後、測定を開始した。

表面筋電図信号は、等速性筋力測定機器からの膝屈曲トルク信号と信号同期用スイッチ(LED同期システム, フォーアシスト)から出力した矩形波信号とともにデータ獲得インターフェース(Power1401, CED社)に接続し、多目的データ記録解析ソフトウェア(Spike2, CED社)を用

いて計測を行った。サンプリング周波数は2000Hzとした。表面筋電図信号、膝屈曲トルク信号とスイッチ信号を記録することで、膝関節回旋角度を計測するためのビデオ映像に表示されるライトをスイッチ信号のタイミングとして各信号を同期した。

5. 信号処理

膝関節回旋角度の信号処理として、算出した膝関節回旋角度から漸増出力課題中の最大外旋角度および最大内旋角度を算出した。各試行で収縮開始前1秒間の平均角度を安静時回旋角度と定義し、安静時回旋角度から最大外旋角度および最大内旋角度までの変化量を各試行の外旋角度変化量、内旋角度変化量として算出した。各試行で膝関節屈曲トルク発揮中において外旋角度変化量と内旋角度変化量の大きい値を採用し、その施行での膝関節最大回旋角度変化量とした。膝関節最大回旋角度変化量は、3回実施した漸増出力課題で算出した平均値を代表値とした。

筋電図の信号処理として、今回用いた筋電計では、表面筋電計のアンプの特性として高域遮断周波数450Hz、低域遮断周波数20Hzでフィルタ処理し、1000倍で増幅した信号をデータ獲得インターフェースを用いてパーソナルコンピュータに記録した。保存された筋電図データはオリジナルプログラム(Matlab R2015b, Mathworks社)にて4次のバターワースフィルタで帯域遮断処理し(低域遮断周波数10Hz、高域遮断周波数450Hz)、以下の解析を実施した。

MVC課題中の筋電図は、最大トルク発揮中の3秒間のうち最大膝屈曲トルクを含む1秒間を解析区間として各筋の筋電図積分値(integrated electromyography, 以下 iEMG)を算出した。iEMGは、フィルタ後の波形を全波整流し、解析区間の積分値として求めた。MVC課題のiEMG値は、3回実施したMVC課題から算出したiEMG値の平均値を代表値とした。

漸増出力課題では膝関節回旋運動が生じるタイミングが各被験者によって異なったことから、安静時から膝関節最大回旋角度変化量が生じるまでを筋電図解析区間とした。解析区間における各筋のiEMG値を算出し、膝関節最大回旋角度が生じるまでの筋活動量の指標とした。各試行、および各被験者で得られたiEMG値を比較するために、各被験者が実施したMVC課題中の1秒間のiEMG値を基準に標準化した。標準化したiEMG値について各筋の筋活動量を比較するために、STに対するBFのiEMG比、SMに対するBFのiEMG比、STに対するSMのiEMG比をそれぞれ以下の式で算出した。漸増出力課題時のiEMGは、3回実施した漸増出力課題で算出したiEMG比の平均値を代表値とした。

$$\text{STに対するBFの筋電図積分値比} = \frac{\text{BFのiEMG値 (\%MVC)}}{\text{STのiEMG値 (\%MVC)}}$$

$$\text{SMに対するBFの筋電図積分値比} = \frac{\text{BFのiEMG値 (\%MVC)}}{\text{SMのiEMG値 (\%MVC)}}$$

$$\text{STに対するSMの筋電図積分値比} = \frac{\text{SMのiEMG値 (\%MVC)}}{\text{STのiEMG値 (\%MVC)}}$$

6. 統計学的解析

統計学的解析として、漸増出力課題において得られた各筋のiEMG比と膝関節最大回旋角度変化量についてピアソンの積率相関係数を求めた。有意水準は5%とした。統計処理には、IBM SPSS statistics (Ver.22, IBM社)を用いた。

III. 結 果

各被験者における漸増出力課題時の標準化したiEMG値と膝関節最大回旋角度変化量の結果を表1に示す。13名の被験者のうち、等尺性膝関節屈曲収縮中に膝関節外旋運動したのが9名、膝関節内旋運動したのが4名であった(表1)。

各筋のiEMG比と膝関節最大回旋角度変化量について図に示す(図2 A-C)。膝関節最大回旋角度変化量との関係は、STに対するBFのiEMG比が $r = -0.58$ ($p = 0.04$)、SMに対するBFのiEMG比が $r = -0.64$ ($p = 0.02$)であり、有意な負の相関が認められた。STに対するSMのiEMG比は、膝関節最大回旋角度変化量との相関係数が $r = 0.13$ ($p = 0.68$)であり、統計学的に有意な関係は認められなかった。

表1 各被験者における各筋の筋電図積分値と膝関節最大回旋角度

被験者	%iEMG			膝関節 最大回旋角度 (°)
	BF	SM	ST	
A	61.0	46.0	42.5	1.7
B	27.0	43.5	33.6	8.6
C	16.8	16.9	23.2	-3.8
D	71.9	81.0	94.9	-8.2
E	230.1	129.5	170.3	-10.1
F	270.6	293.1	287.9	7.8
G	49.5	104.3	65.9	4.9
H	96.5	99.0	157.7	1.6
I	63.2	92.3	107.8	-1.0
J	54.5	95.3	127.3	10.4
K	182.3	282.3	282.3	10.6
L	140.9	144.0	154.3	5.2
M	180.9	139.5	254.4	2.9

%iEMG: 最大随意収縮課題時の筋電図積分値で標準化した漸増出力課題中の筋電図積分値

BF: 大腿二頭筋, SM: 半膜様筋, ST: 半腱様筋

膝関節最大回旋角度: +; 外旋, -; 内旋

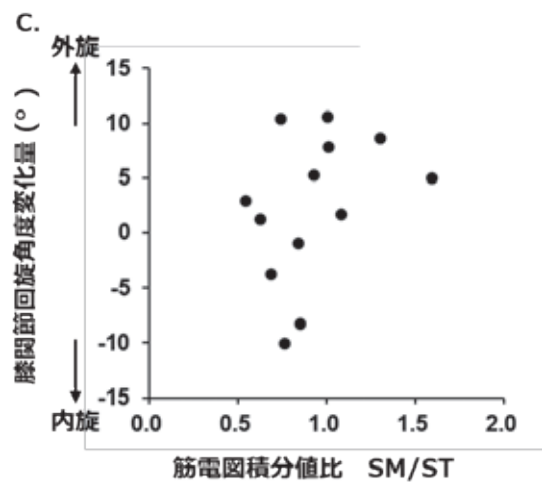
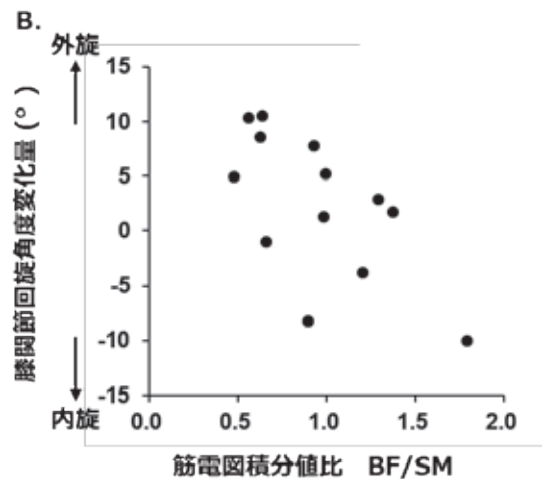
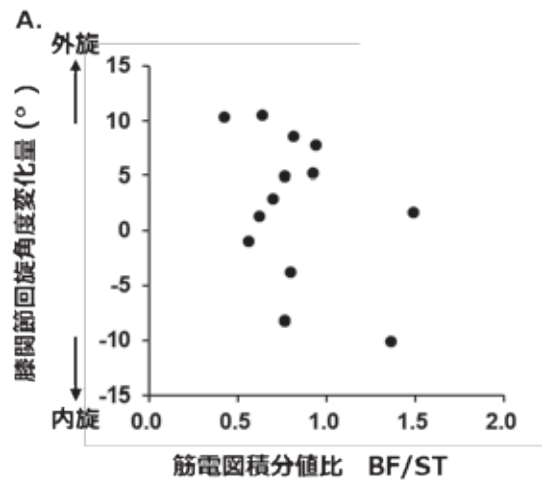


図2 各筋の筋電図積分値比と膝関節外旋角度変化量

A: 半腱様筋に対する大腿二頭筋の筋電図積分値比

B: 半膜様筋に対する大腿二頭筋の筋電図積分値比

C: 半腱様筋に対する半膜様筋の筋電図積分値比

BF: 大腿二頭筋, SM: 半膜様筋, ST: 半腱様筋

IV. 考 察

本研究の結果から、膝関節屈曲90°位での内外側ハムストリングスの等尺性収縮中の筋活動量と膝関節回旋角度の間にこれまでに報告されている作用とは異なる関係がある可能性が示された。本研究の結果を踏まえたハムストリングが有する膝関節回旋作用について考察する。

1. ハムストリングの膝関節回旋作用について

本研究では、膝関節屈曲収縮中の膝関節回旋運動に着目し、ハムストリングの筋活動量と膝関節回旋角度の相関関係を検討することを試みた。その結果、膝関節最大回旋角度変化までの区間において、STに対するBFのiEMG比と、SMに対するBFのiEMG比が高値となると膝関節内旋する結果となった。今回の結果は、これまでに報告されてきたハムストリングの膝関節回旋作用とは異なる結果であった。

ハムストリングを構成するそれぞれの筋は、その形態や走行が異なることが報告されており、各筋が有する機能が異なることが予測されている¹⁻³⁾。これまでの研究の中で、ハムストリングの膝関節回旋作用に関する報告として、内側ハムストリングと外側ハムストリングの違いについて報告されている^{7,9)}。Mohamed et al.⁷⁾は、膝関節回旋肢位を変化させて等尺性膝関節屈曲収縮させたときのハムストリングを構成する筋の筋活動量を検討し、膝関節内旋位でSTとSM、膝関節外旋位でBFの筋活動量が大いことを報告した。Jonasson et al.⁹⁾は、膝関節外旋位と内旋位での等尺性膝関節屈曲収縮中の内側ハムストリングと外側ハムストリングの表面筋電図を比較し、外側ハムストリングが膝関節内旋位で筋活動量が低下することを報告した。これらの報告は、内側ハムストリングと外側ハムストリングの解剖学的な走行を考慮すると妥当な結果である。また、膝関節周囲筋が有する膝関節回旋運動のモーメントアームを計測した研究では、大腿二頭筋は膝関節外旋のモーメントアームを有し、STとSMは膝関節内旋のモーメントアームを有すると報告されている^{3,6)}。これらの報告から、ハムストリングは膝関節回旋運動の作用を有し、内側ハムストリングと外側ハムストリングで膝関節回旋に関わる筋機能は異なることが示唆されている。

本研究では、等尺性膝関節屈曲収縮中のSTに対するBFのiEMG比と、SMに対するBFのiEMG比が高値となると膝関節外旋角度が低下する結果となった。これまでの報告を参考とすると、内側ハムストリングに対して外側ハムストリングの筋活動量が増加すると、外側ハムストリングの作用により膝関節外旋すると考えられる。しかし、本研究で行った膝関節屈曲収縮中の不随意的膝関節回旋運動は、これまでのハムストリングが有する膝関節回旋作用とは反対の結果であった。この理由のひとつとして、ハムストリン

グにおける神経筋活動の膝関節屈曲角度特異性が考えられる。本研究では膝関節屈曲90°位での等尺性収縮を運動課題として実施したが、ハムストリングの神経筋活動は、膝関節屈曲角度によって内側ハムストリングと外側ハムストリングの活動動態が異なることが報告されている^{8,10)}。Onishi et al.⁸⁾は、膝関節屈曲60°と90°での等尺性収縮課題において、BFのみが60°で筋活動量が大きく、ST、SM、大腿二頭筋短頭は90°で筋活動量が大いことを報告した。西野ら¹⁰⁾は膝関節屈曲の等尺性収縮中の筋活動を検討し、膝関節深屈曲位においてSTがSM、BFと比較して筋活動量が大いことを報告した。また、膝関節屈曲角度が大きくなると各筋の膝関節屈曲モーメントアームが変化し、STのみが膝関節屈曲位でも膝関節屈曲モーメントアームが増加することが報告されている⁴⁾。これらの報告から、本研究で行った膝関節屈曲90°位では内側ハムストリングの筋活動量が高値となり、外側ハムストリングは低値を示すと考えられる。このことから、内側ハムストリングに対する外側ハムストリングの筋活動量比は低値となった。本研究の肢位が膝関節屈曲90°位であったことが、内側および外側ハムストリングのiEMG比に影響を及ぼした可能性がある。

また、膝関節屈曲位での膝関節回旋モーメントアームが関係したことも本研究の結果を生じた理由として考えられる。Buford et al.⁶⁾は、膝関節回旋運動の可動域は膝関節屈曲角度により変化することを報告している。また、その研究の中では、膝関節周囲筋の膝関節回旋モーメントアームは、膝関節屈曲・回旋角度によって変化し、大腿二頭筋は膝関節屈曲90°において外旋モーメントアームが最も大きくなることを示している⁶⁾。大腿二頭筋の筋活動量は内側ハムストリングの筋活動量と比較して低値となっていたが、筋活動量が低く、誘起される収縮強度が小さくとも膝関節回旋モーメントアームの利得の影響で膝関節外旋運動を生じさせたことも考えられる。関節角度変化によるモーメントアームの変化と筋活動量の変化については、更にデータ計測を行い検討する必要があると考える。

本研究の結果は、これまでに報告されているハムストリングの膝関節回旋作用とは異なる結果であり、膝関節屈曲90°位でのハムストリング収縮中の膝関節回旋運動の特徴として新規的である。膝関節回旋運動を評価することで内側ハムストリングと外側ハムストリングの筋活動量比を示すことができることから、膝関節屈曲位でのハムストリング各筋の収縮動態を評価する方法の基礎的情報となる可能性がある。

各被験者の結果を確認すると、各筋のiEMGは被験者によってばらつきがあった。これは、ハムストリングの収縮開始から膝関節最大回旋角度となるタイミングが被験者によって異なることから生じたものである。最大回旋角度がハムストリングの収縮開始から早いタイミングで生じた場合には各筋のiEMGは低値となり、遅いタイミングで膝関節最大回旋角度となるとiEMGは高値となる。本研究では

各筋のiEMG比を用いることで、各被験者の最大回旋角度までの時間を正規化し、解析区間の長さによる影響を排除することを試みた。また、各被験者で膝関節回旋角度の振る舞いが異なることについては、各被験者の膝関節の骨形態やアライメントなど筋活動量以外の理由も関与することが考えられる。Jungers et al.¹¹⁾は、ヒトは直立二足歩行をしているため、他の類人猿と比較して膝関節など後肢の形態について個体間の標準偏差が大きいことを報告した。膝関節屈曲伸展軸は膝関節屈曲角度によって大腿骨内側顆・外側顆内で移動することは知られており¹²⁾、大腿骨内側顆・外側顆の形態が変化すれば屈曲伸展軸は影響を受けることが推察される。また、膝関節回旋軸は屈曲伸展軸よりも前方で、前十字靭帯や後十字靭帯の付着部の近くを通過することが報告されており¹³⁾、これも膝関節の形態によって影響を受けることが推察される。骨形態だけでなくアライメントに関しても、膝関節回旋角度が異なると膝関節回旋モーメントアームが異なることは報告されている⁶⁾。本研究では膝関節屈曲角度は規定したが、膝関節回旋のアライメントについては考慮せず、膝関節回旋角度の変化量として筋活動量と検討したが、測定肢位での回旋角度が各被験者の膝関節回旋運動のばらつきの要因となる可能性がある。今後の課題として、各被験者の膝関節回旋運動のばらつきの要因についても検討する必要がある。

2. 本研究の限界

本研究では、膝関節回旋角度についてカメラを用いた二次元画像から算出した。本実験では、理学療法場面で実施する筋力発揮場面を想定したときに視覚的に確認できる二次元での動作解析を目的として行ったため、足底面から撮影した画像で膝関節回旋角度を測定した。本来の膝関節回旋角度は大腿骨遠位と脛骨近位の位置関係によって表現されるものであることから、今回計測した方法では脛骨近位の運動自体を捉えていないため、膝関節回旋角度に影響があった可能性がある。今回の結果は、視覚的に回旋運動を捉えやすいという意味で有用な結果であるが、三次元動作解析によっては大腿骨と脛骨の成す回旋角度を計測し、今回の二次元画像での解析で得られた膝関節回旋角度と比較する必要がある。

V. ま と め

本研究では、膝関節屈曲運動中のハムストリングの筋活動量と膝関節回旋角度の関係を検討した。漸増出力課題中のハムストリングの筋電図積分値と膝関節回旋角度の結果、半腱様筋に対する大腿二頭筋の筋電図積分値比、および半膜様筋に対する大腿二頭筋の筋電図積分値比が膝関節最大回旋角度変化量と有意な負の相関が認められた。この結果から、膝関節屈曲90°位での膝関節回旋角度を評価することで、内側ハムストリングに対する外側ハムストリン

グの収縮動態を推測することができる可能性がある。

引用文献

- 1) Wickiewicz TL, Roy RR, Powell PL, et al.: Muscle architecture of the human lower limb. Clin Orthop Relat Res : 275-283, 1983
- 2) Herzog W, Read LJ: Lines of action and moment arms of the major force-carrying structures crossing the human knee joint. J Anat 182 (Pt 2) : 213-230, 1993
- 3) Kim AW, Rosen AM, Brander VA, et al.: Selective muscle activation following electrical stimulation of the collateral ligaments of the human knee joint. Arch Phys Med Rehabil 76 : 750-757, 1995
- 4) Buford WL, Jr., Ivey FM, Jr., Malone JD, et al.: Muscle balance at the knee--moment arms for the normal knee and the ACL-minus knee. IEEE Trans Rehabil Eng 5 : 367-379, 1997
- 5) Neumann DA: 膝関節. 筋骨格のキネシオロジー 原著第2版. 医歯薬出版, 2012, p569-628
- 6) Buford WL, Jr., Ivey FM, Jr., Nakamura T, et al.: Internal/external rotation moment arms of muscles at the knee: moment arms for the normal knee and the ACL-deficient knee. Knee 8 : 293-303, 2001
- 7) Mohamed O, Perry J, Hislop H: Synergy of medial and lateral hamstrings at three positions of tibial rotation during maximum isometric knee flexion. Knee 10 : 277-281, 2003
- 8) Onishi H, Yagi R, Oyama M, et al.: EMG-angle relationship of the hamstring muscles during maximum knee flexion. J Electromyogr Kinesiol 12 : 399-406, 2002
- 9) Jonasson G, Helgason A, Ingvarsson T, et al.: The Effect of Tibial Rotation on the Contribution of Medial and Lateral Hamstrings During Isometric Knee Flexion. Sports Health 8 : 161-166, 2016
- 10) 西野章江, 牧原由紀子, 福林徹: 膝屈筋腱を使用したACL再建術後の膝関節深屈曲位における筋力低下. 臨床スポーツ医学 22 : 273-281, 2005
- 11) Jungers WL: Relative joint size and hominoid locomotor adaptations with implications for the evolution of hominid bipedalism. Journal of Human Evolution 17 : 247-265, 1988
- 12) Smidt GL: Biomechanical analysis of knee flexion and extension. J Biomech 6 : 79-92, 1973
- 13) Hollister AM, Jatana S, Singh AK, et al.: The axes of rotation of the knee. Clin Orthop Relat Res : 259-268, 1993