

動作解析装置による健常者膝関節のペンドラム指数計測

THE MEASUREMENT OF PENDULUM INDEX OF NORMAL KNEE JOINTS BY MOTION ANALYSIS

靖 大鎧¹⁾、 橋浦 樹里¹⁾、 桜井健太郎²⁾、 杉本 幸洋³⁾、 佐直 信彦¹⁾

DaZheng JING Juri HASHIURA Kentarou SAKURAI Yukihiro SUGIMOTO Nobuhiko SAJIKI

キーワード：膝関節振子運動、ペンドラム指数

Key words : Pendulum motion of knee joint, Pendulum index

要 旨

目的：ペンドラム指数は膝関節の振子運動時に測定する初回落下角度と最終静止角度から算出する。われわれは『改訂筋緊張テストバッテリー modified Ashworth scale of muscle spasticity ; MAS』に基づき、健常者(正常筋緊張 MAS 0段階)のペンドラム指数を測定したので、以下の報告を行う。

対象と方法：被検者は健康な若年男女20名である。実験は、座位、半臥位、仰臥位の三つの姿勢で行った。反射マーカーを被検者の大転子(大腿部)、膝関節外側部裂隙中心部、外果(下腿部)に取り付け、二次元運動解析装置により、膝振子運動時の膝関節角度を測定した。

結果：座位ペンドラム指数は1.76(±0.04)、半臥位は1.83(±0.05)、仰臥位は1.91(±0.04)である。座位ペンドラム指数に比べ、半臥位の有意差が認められなかったが、仰臥位が有意に増加することが認められた(P<0.01)。半臥位に比べ、仰臥位が有意に増加することも認められた(P<0.05)。三つの姿勢においても男女間の有意差が認められなかった。ペンドラム指数の姿勢による変異については、筋長、緊張性姿勢反射の視点から考察した。

Abstract

[Purpose]

The pendulum index of knee joint is calculated from initial falling angle and final resting angle of its pendulum motion. Based on modified Ashworth scale for muscle spasticity, MAS “0” is defined normal knee joint to be tested.

1) 仙台青葉学院短期大学 リハビリテーション学科 2) 仙台東脳外科病院 3) 国立病院機構あきた病院
受理日：2016年2月1日

[Subjects and Methods]

20 healthy young men and women were enrolled. Upright sitting, half-lying, and supine postures were used to compare the effects of posture on the pendulum index. Reflection markers were put on the surface of greater trochanter of femur, center of knee joint cleft, and lateral malleolus respectively. A two-dimension motion analysis system was used to measure the angles of pendulum motion.

[Results]

The Pendulum indexes were 1.76(\pm 0.04) in upright sitting posture, 1.83(\pm 0.05) in half-lying posture, and 1.91(\pm 0.04) in supine posture respectively. There is no significant difference of indexes between upright sitting and half-lying posture. However, there are significant differences of indexes between upright sitting and supine posture ($P<0.01$), and between half-lying and supine posture ($P<0.05$). There is also no significant difference of indexes between male and female gender.

1. はじめに

痙性麻痺は脳卒中や脊髄損傷などの中枢神経疾患にみられ、出現率の高い症状である。その評価方法として、Bohannonらによる『改訂筋緊張テストバッテリー modified Ashworth scale of muscle spasticity ; MAS』が臨床で使われてきた¹⁾。これは検者が他動的に被検者の関節を屈伸させるとき、感じる抵抗力により痙縮の有無および痙縮の程度を判断する徒手的方法である。この手法は検者間の判断された内容に差が生じるため客観性が乏しく、定量的な結果ではないため痙縮程度の量的判断も難しいので、信頼性に欠けている。

客観的および定量的に行う痙縮評価の方法は、医学界で長年研究され模索されている重要な課題の一つである。川村ら(1989年)は半臥位姿勢で電気角度計を用いた健常者11人の膝関節振子テストを行い、リラックス指数としてその平均値が1.8であると報告している²⁾。柳沢ら(1997年)は誘発筋電図 H 反射について、症例ごとの H/M 閾値比は、痙縮の程度あるいは痙縮があるか否かの評価に有用とはならないと報告している。このような H/M 閾値比のバラツキは、M 波および H 反射を生じる線維の神経幹内走行の物理的条件により、電気刺激による興奮が均一でないことが大きな原因と考えられる³⁾。Fowlerら(2000年)は、痙縮

の各種評価尺度を MAS による評価と比較し、下腿の初回落下角度(膝関節最大屈曲角度)から最終静止角度に至る変化量から求めたペンドラム指数が最も高い妥当性を示すことを明らかにした⁴⁾。土屋一洋(2001年)は近年、CT や MRI などの出現により反射亢進発生源の特定やその大きさの把握が可能となったが、反射亢進を引き起こす上位中枢の障害部位やその大きさが把握できたとしても、それによって引き起される反射の程度とは必ずしも結び付かず、特に歩行あるいは、その他の日常生活動作への影響を問題とするリハビリテーション分野では、依然としてその定量化の確立が強く望まれていると報告している⁵⁾。松田ら(群馬大学、2005年)は加速度計を用いた下肢振り子試験による痙縮の評価を実施し、最大加速度よりも最大加速度時間の方が痙縮の程度を示す指標となり得ることを示唆した⁶⁾。以上の報告はより定量性・客観性を求めた研究ではあるが、ほとんど評価方法に関する研究で、今でも臨床として簡単に利用できる痙縮麻痺を判断する基準は少ない。

ペンドラムテストは下腿を自由落下させるときの膝関節運動から、痙縮を評価しようとする検査法である。この検査法は、無拘束、無侵襲、かつ、取扱いが容易であることから、有用性のある方法として注目されてきた⁷⁾。このペンドラムテストは、座位における片側膝伸展位から下腿が自重に

よる落下運動が起こり、膝関節の屈曲時に大腿四頭筋が伸張され、その際大腿四頭筋の筋緊張と重力により初回落下角度を決定し、数回の膝関節屈曲・伸展運動による下腿の振り運動が行われた後、最終的に大腿四頭筋の筋緊張により停止する。その初回落下角度と最終停止角度から求める大腿四頭筋の筋緊張がペンドラム指数を反映する。特に痙縮発生の程度は加速度により強くなる傾向がある⁶⁾ので、下腿の落下加速度による大腿四頭筋の筋緊張は痙縮を測る不可欠な要素であるため、ペンドラムテストは大腿四頭筋の痙縮の評価に妥当性が高い。

我々はペンドラムテストを用いて、大腿四頭筋の筋緊張性を客観的に評価する目的で、健康者を対象にして、その基準となる正常筋緊張のMAS 0段階のペンドラム指数を計測したので報告する。

2. 対象と方法

2.1 対象

被検者は健康な若年男女20名である。男性(子)は10名で、年齢は20-21(20.5±0.5)歳で、女性(子)は10名で、年齢は20-21(20.3±0.5)歳である。

研究に先立ち、個人情報保護法に基づき、計測により得る個人データを研究者が厳重に保管すること、研究の結果は被検者が特定されないように発表・掲載が行われる等の原則を定めた。被検者には研究の趣旨および内容を十分に説明し、被検者の同意書による署名を得た上で測定を行った。

2.2 実験システム

一般に、被検者が座位をとってペンドラムテストを行う。川村氏らは半臥位の姿勢で計測を行った²⁾。我々は計測姿勢の異なることにより、そのペンドラム指数に与える影響を確認するため、座位(股関節90度屈曲)、半臥位(股関節45度屈曲)、仰臥位(股関節0度進展位)によりペンドラムテストを行った。

図1は座位における実験システムを示す。被検者は低反射クッションを敷いた実験台の上に座位

をとり、背部に支持板を置き、計測下肢が着地しないように実験台の高さを調整する。被検者の反対側足底に踏み台を置き、支持板と共に座位のバランスをとる。被検者が膝関節の最大振り運動時、その屈曲運動に対し実験台が邪魔しないよう、検者は被検者膝関節の実験台から突出の程度を調整する。

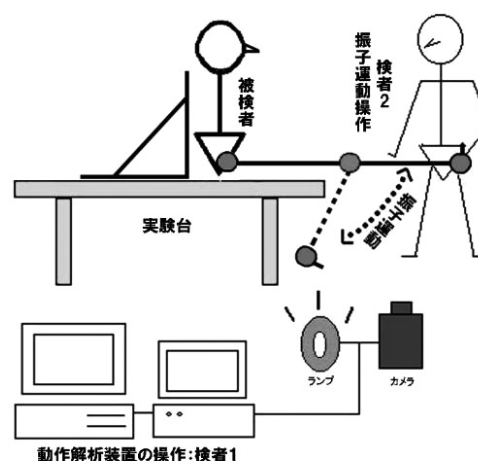


図1 座位よりペンドラム指数を計測する動作解析装置

膝関節角度を記録する二次元運動解析装置は、クイックマーグ・システムⅢ(OKK社製)を用いる。カラー反射マーカを被検者の大転子、膝関節外側部裂隙中心部、外果に取りつける。検者1は運動解析装置を操作し、検者2は被検者の計測下肢の踵を持ち、膝関節を真っ直ぐ伸ばしている位置を保つ。被検者のリラックス状態が整えば、検者1はスタート命令を出すと、検者2は計測下肢の踵を離し、被検者の下腿が自重により落下する。最大膝屈曲角度になってから、慣性により伸展に転じ、以上の屈曲・伸展という振り運動は繰り返された後、膝関節が屈曲位に停止する。計測は1人の被検者につき連続三回実施した。3回の平均値をその被検者の代表値とした(これでよいか?)。

1) ペンドラム指数の計算方法

図2は、ペンドラムテストにより記録した膝関節の落下運動軌跡グラフである。ペンドラム指数は、初回落下角度を最終静止角度で割って求めた。

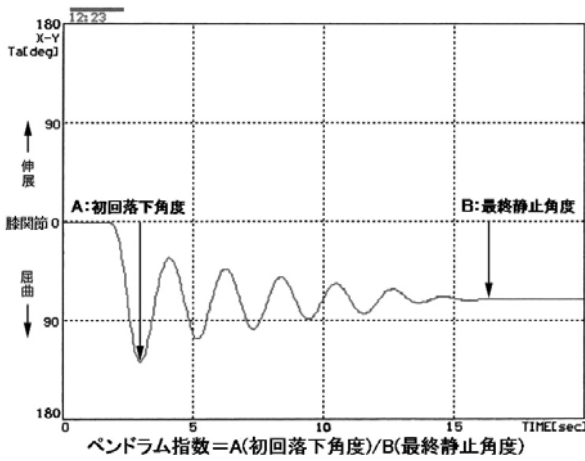


図2 ペンドラム指数の計算方法

2) ペンドラム指数の補正計算

膝関節の振子運動では、被検者の膝関節が真っ直ぐ伸ばされた状態から始まる。その際、被検者膝関節の角度は0度になる場合も、0度でない場合もある。つまり、計測の起始状態において、膝関節が屈曲位或いは伸展位になる可能性がある。

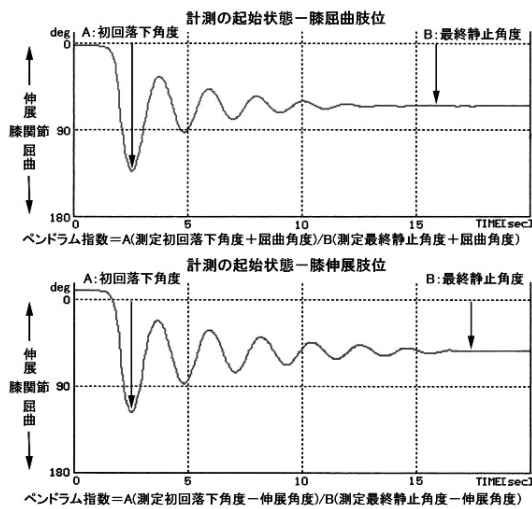


図3 ペンドラムテスト計測の膝伸展・屈曲肢位による補正計算

図3は、膝関節の計測起始状態が0度でない場合のペンドラム指数の測定グラフと補正計算の方法を示す。伸展位の場合は、[ペンドラム指数 = A(測定初回落下角度 - 伸展角度) / B(測定最終静止角度 - 伸展角度)] の式で計算する。屈曲位の場合は、[ペンドラム指数 = A(測定初回落下角度 + 屈曲角度) / B(測定最終静止角度 + 屈曲角度)] の式で計算する。

2.3 対照研究

一般に、被検者が座位をとってペンドラムテストを行う。川村氏らは半臥位の姿勢で計測を行った²⁾。我々は計測姿勢の異なることにより、そのペンドラム指数に与える影響を確認するため、半臥位・仰臥位によりペンドラムテストを行った。計算式は同じである。

3. 結果

3.1 ペンドラムテストの測定結果

表1は座位、表2は半臥位、表3は仰臥位で、男性10名、女性10名を測定した計20名健常被検者のペンドラム指数である。

表1 座位テストにより計測した健常者膝関節ペンドラム指数 男10名女10名

	初回落下角度	最終静止角度	ペンドラム指数
平均値	124.84	71.23	1.76
標準偏差	2.75	0.66	0.04

表2 半臥位テストにより計測した健常者膝関節ペンドラム指数 男10名女10名

	初回落下角度	最終静止角度	ペンドラム指数
平均値	123.06	67.25	1.83
標準偏差	3.34	0.94	0.05

表3 仰臥位により計測した健常者膝関節ペンドラム指数 男10名女10名

	初回落下角度	最終静止角度	ペンドラム指数
平均値	117.93	61.87	1.91
標準偏差	2.15	0.74	0.04

3.2 座位・半臥位・仰臥位により行ったペンドラム指数の比較

図4は、三種類の姿勢により測定したペンドラム指数を比較したグラフである。座位でのペンドラム指数は半臥位に比べ、t検定により統計処理した結果に有意差はないが、仰臥位が有意に増加することが認められた(P<0.01)。また、仰臥位が半臥位に比べ、有意に増加することも認められた(P<0.05)。

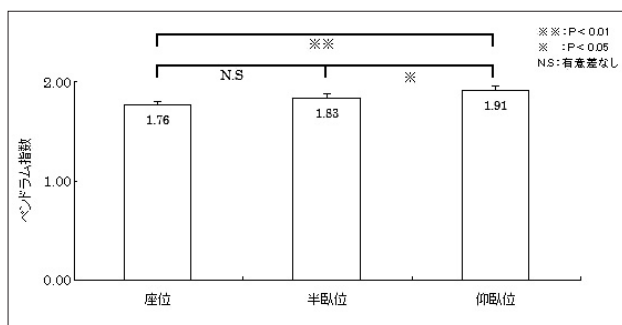


図4 健常者膝関節ペンドラム指数 座位・半臥位・仰臥位の比較

3.3 ペンドラム指数の男女の比較

一般に女性の関節が柔らかく、肘や膝を真っ直ぐ伸ばした時に、過伸展することは少なくないと言われている。男女間の相違について、我々は座位・半臥位・臥位により測定したそれぞれ10名ずつのペンドラム指数を統計処理した。しかし男女の平均ペンドラム指数に対し、t検定を行ったが、その有意差が認められなかった(図5)。

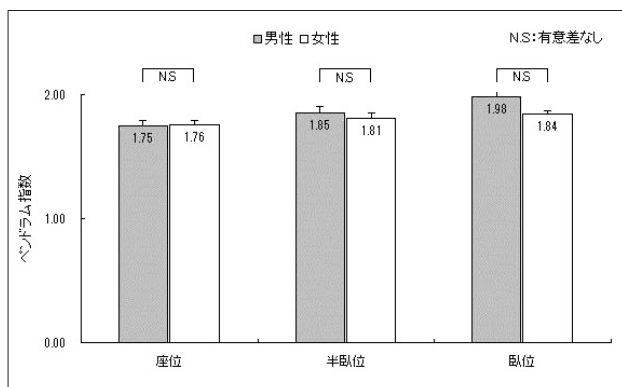


図5 座位・半臥位・仰臥位別 健常者の膝関節平均ペンドラム指数の男女比較

4. 考察

1) 大腿四頭筋の筋緊張性の評価におけるペンドラム指数の有用性

下腿振り運動は、検者の手で被検者の踵を持ち、膝関節を真っ直ぐ伸ばした状態(静止高度)から被検者の踵を離すと、下腿で行われる屈曲・伸展の繰り返し運動を指す。その際、膝関節を支点として、静止高度において下腿の重力により蓄積された位置エネルギーを放出することによって振り運動が行われる。一旦、振り運動が始まると、位置エネルギーから生じる運動エネ

ルギーは屈伸運動を持続させる動力となる。しかし、ヒトの肢体で行う振り運動では、関節可動域・筋長(筋と腱の長さ)・筋緊張性などの制限を受け、これらは運動中において常に運動エネルギーを消費しているため、最終的に振り運動は停止してしまう。

膝関節を屈曲(の屈曲を)させる駆動力は下腿の重力(重力=質量×重力加速度)から発生するが、逆に制動力は伸長される大腿四頭筋から生じる。初回落下時、膝関節は下腿重力により屈曲位へ振出し、一定の屈曲角度になると屈曲運動が停止する。その停止した膝関節屈曲角度が「初回落下角度」で、その際発生した屈曲駆動力と屈曲角度は最大となる。初回落下時の屈曲運動は大腿四頭筋の筋長・筋緊張性の制限を受けて停止するので、大腿四頭筋が最大限伸長されたときに生じた筋緊張性を反映していると考えられる。その後、膝関節の最大屈曲角度で生じた伸展運動エネルギーと伸長された大腿四頭筋に起こる伸張反射から出る筋収縮力とともに、下腿を逆の膝関節伸展位に振り戻す。下腿は膝関節の伸展位へ振り向かう際、膝関節屈筋のハムストリングスに対し筋緊張をもたらす。このハムストリングスが発生する筋緊張は伸展運動エネルギーを消費するため、膝関節の伸展角度は「初回落下角度」より小さくなる。

1周期目の膝関節振り運動後、伸展位と屈曲位でそれぞれ蓄えられる屈曲運動と伸展運動のエネルギーのどちらが強くなれば、下腿を再びそれぞれ前者-屈曲位に振出したり、後者-伸展位に振り戻したりして、膝関節の振り運動が繰り返される。同時に、引き起される大腿四頭筋とハムストリングスの筋緊張によって、屈曲運動と伸展運動のエネルギーを消費する。何回も振り運動をした末、運動エネルギーがゼロとなり、膝関節の振り運動が停止する。振り運動が停止した膝関節の角度は「最終静止角度」である。この「最終静止角度」は膝関節の屈曲状態で、健常者として下腿重力から発生する屈曲力と大腿四頭筋の筋緊張から発生する伸展力は

等しくなり、静止状態となる。

脳卒中が原因である片麻痺者で問題となる症状のひとつに“痙縮”があげられる。痙縮とは、伸張反射が異常に高まり、筋緊張(筋の硬さ)が亢進している状態である。これにより、自分の意志とは関係なく麻痺肢の筋が収縮してしまう。そのため臨床現場においては、痙縮を簡単に、客観的、定量的に計測できる測定方法が望まれている⁸⁾。

中枢神経障害に見られる痙縮に対し定量的評価を行う測定方法としてペンドラムテストに着目し、20名の健常被検者を対象とし、ペンドラムテストを行い、ペンドラム指数として、座位1.76(±0.04)、半臥位は1.83(±0.05)、仰臥位は1.91(±0.04)の値を得た。これはMASの0段階(正常筋緊張)の基準として利用することができる。しかし、臨床の場で有用であるか否かは、今後の研究として、MSA 1～4段階による痙縮患者のMSAとペンドラム指数の関連性を分析し、定量的痙縮評価としての客観的根拠を検証する必要がある。

2) 計測姿勢によるペンドラム指数の変化

ペンドラムテストを行う姿勢について、多くの研究者は座位で計測を行っているが、川村ら²⁾・駒井ら⁹⁾は半臥位で行った。これらの対象は頸髄損傷患者のみで、座位をとることが難しかったからではなかろうかと推察している。しかし、筋の張力発生には筋長、緊張性姿勢反射などに影響を受ける。とくに、痙性麻痺においてこれらは重要な要因となる。我々は健常者を対象にして計測姿勢の相異によりペンドラム指数に対する影響を調べるため、座位、半臥位と仰臥位の三つの姿勢で研究を行った。結果は座位に比べ、半臥位・仰臥位姿勢の順で初回落下角度・最終静止角度が小さくなり、逆にペンドラム指数は大きくなる傾向があった。これは初回落下角度より、最終静止角度の減少が大きいためである。その理由について、初回落下角度が重力から駆動された屈曲力と膝・股関節の角度により伸長された大腿四頭筋の長さ

と筋緊張性のみを表すものであると予想される。仰臥位で測定したペンドラム指数は座位に比較して、統計的により有意に増加したことが認められた($P < 0.01$)。半臥位は座位に比べ、ペンドラム指数の間には有意差が認められなかった。

計測姿勢によるペンドラム指数の変化について、前庭器官内の耳石器と迷路反射路にかかわる姿勢反射に関係があると考えられる。前庭器官からの脊髄への反射弓の中継細胞である前庭神経核はこのような入力を受け、出力により多くの筋の張力を調節する。身体を水平背位にすると四肢の伸筋緊張が優位に高まる。水平腹位では逆に屈筋緊張が優位となる。座位はその中間の位置で、伸筋、屈筋の緊張の優位性は消失する¹⁰⁾。今回の三つの実験姿勢の緊張性迷路反射による伸筋への優位性は仰臥位、半臥位、座位の順になると推論される。

また、膝・股関節の角度は大腿四頭筋、ハムストリングスの筋長も関係すると考えられる。大腿直筋の起始は下前腸骨棘と寛骨臼上縁で、停止は膝蓋骨底と脛骨粗面で、ハムストリングスの起始・停止は主に坐骨結節と脛骨で、両方とも股関節と膝関節を跨る二関節筋である¹¹⁾。半臥位・仰臥位の姿勢をとった場合は、座位に比べ大腿直筋が伸長された状態にあるが、ハムストリングスは逆の関係にある。筋長の変化による筋受容器のIa群線維により発射されるインパルスは当該筋を支配する α 運動ニューロンの促通状態を修飾する¹²⁾。初回落下角度が座位より臥位で小さいのは緊張性迷路反射と大腿伸筋の筋長の相加作用で説明できる。振り子運動を繰り返して静止状態になる過程では、ハムストリングスからの膝伸展の制動が働き、座位で最終静止角度が大きかったと推察される。最終静止角度の座位と仰臥位の差($\Delta 9.36$)は初回落下角度の差($\Delta 6.91$)より大きかったのは、ハムストリングスの制動効果が推察される。半臥位と座位及び仰臥位との関係においても筋長が座位

と仰臥位の間であるという点から説明が可能である。健常者で緊張性迷路反射がペンドラム指数にどの程度影響するかはさらに検証しなければならないが、伸筋・屈筋の筋長は健常者でも無視できないことが明らかになった。したがって、筋長に影響する測定姿勢は重要な課題であることは明らかである。

3) 計測機器により測定した精度の相異

本研究で、半臥位により測定したペンドラム指数は1.83である。これは川村らの発表した半臥位での1.8²⁾と比べ、少しの差が存在している。しかし、川村らの対象は脊髄損傷患者であり、痙縮との関連は不明であり、我々の対象は健常者であり、一概には比較できない。

我々の実験において使用した計測機器は二次元動作解析装置で、その測定誤差は±0.5度である。川村らが利用した電気角度計²⁾に比べ、測定の精度が高いことが考えられる。空間定位の記録により、計測起始状態による膝関節の伸展位角度、屈曲位角度を識別することができ、補正計算はできるようになった。

5. 結論

健常者のペンドラム指数は、当該関節の伸筋・屈筋の筋長の影響は明らかで、緊張性姿勢反射の影響も否定できないので、測定姿勢が重要になってくる。膝関節のペンドラム指数計測では、筋長の視点からは論理的には中間姿勢の半臥位が望ましい。しかし、緊張性迷路反射の視点からは伸筋、屈筋に対する優位性の中間姿勢としての座位が望ましい。緊張性姿勢反射の影響が大きい脳卒中による痙性麻痺に適用する場合には、痙縮と姿勢反射の視点から再検討し、適正な測定姿勢を検証する必要がある。

6. 文献

1. Bohannon, R.W., Smith, M.B.: Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys. Ther.*, 1985; 67:206-207.

2. 川村次郎, 他: 脊髄損傷にみられる筋痙攣-その臨床像と治療法. *大労医誌*. 1989; 13-1: 85-97.
3. 柳沢信夫, 他: 神経生理を学ぶ人のために(第2版). 医学書院, 東京, 1997, pp.83-84.
4. E. G. Fowler, A. I. Nwigwe, and T. W. Ho: Sensitivity of the pendulum test for assessing spasticity in persons with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child neurology*. 2000; 42: 182-189.
5. 土屋一洋: CT・MRI Key Words Index 1 頭部 CT・MRI 診断のキーワード99. 廣濟堂, 東京, 2001.114-115.
6. 松田祐一, 他: 加速度計を用いた下肢振り子試験による痙縮の定量的評価. *理学療法臨床と研究*. 2005; 14: 3-6.
7. Wartenberg R.: Pendulousness of the Legs as a Diagnostic Test. *Neurology*. 1951; 1: 18-24.
8. 野平晴彦, 他: 簡易型足部背屈装置を用いた痙性評価法. 第3回バイオメカニズム学術講演会論文集. 1992; 109-112.
9. 駒井啓二, 他: 電気刺激による痙性の抑制とその評価. 第9回バイオメカニズム学術講演会論文集. 1988; 83-89.
10. 問田直幹, 他: 新生理学(上巻). 医学書院, 東京, 1982, pp.1019.
11. 中村隆一, 他: 基礎運動学(第4版). 医歯薬出版社, 東京, 1992, pp. 219-224
12. 大地陸男: 生理学テキスト(第7版). 文光堂, 東京, 2013, pp.94-95.