

■ 原著

## 伸張反射反応に対する叩打速度と質量の影響について

### Influence of mass and velocity of the tendon tap on the stretch reflex response

越野 八重美<sup>1)</sup>, 山口 航輝<sup>1)</sup>, 高橋 優輝<sup>1)</sup>, 高橋 佑輔<sup>1)</sup>, 渡部 純<sup>1)</sup>

Yaemi Koshino<sup>1)</sup>, Koki Yamaguchi<sup>1)</sup>, Yuki Takahashi<sup>1)</sup>, Yusuke Takahashi<sup>1)</sup>, Jun Watanabe<sup>1)</sup>

1) 大阪電気通信大学 医療福祉工学部

大阪府四條畷市清滝 1130-70

TEL: 072-876-5484 E-mail: koshino@osakac.ac.jp

1) Graduate School of Biomedical Engineering, Osaka Electro-Communication University

1130-70 Kiyotaki Shijo-Nawate, Osaka 575-0063, Japan

TEL: +81-72-879-5484 E-mail: koshino@osakac.ac.jp

保健医療学雑誌 ● (●): x-xx, xxxx. 受付日 2018年1月17日 受理日 2018年3月15日

JAHS ● (●): x-xx, xxxx. Submitted Jan. 7, 2018. Accepted Mar. 15, 2018.

#### ABSTRACT:

The purpose of this study was to investigate the magnitude of the stretch reflex response and the threshold at which it appears by changing the mass of the reflex hammer and the velocity of the tendon tap. Tendon taps were applied to the tendon of the quadriceps femoris of 20 healthy volunteers using four levels of reflex hammer mass and five levels of velocity for each mass. We found that the magnitude of the reflex response, as measured by integrated electromyography, increased with an increase in velocity and with an increase in the mass of the reflex hammer. However, there was a threshold of tendon tap velocity to elicit the reflex response, below which no reflex appeared. The findings of this study indicate that the velocity of the tendon tap required to elicit a response was 1–2 m/s.

**Key words:** tendon reflex response, tendon tap velocity, reflex hammer mass

#### 要旨:

本研究の目的は、伸張反射検査において、打腱器の質量と腱を叩打する速度を個別に変化させ、反射の大きさと出現閾値について検討を行うことである。被験者は健常男性 20 名であり、被験筋は大腿四頭筋とした。打腱器の質量を 4 種類用意し、それぞれの質量について 5 段階の速度で叩打を行った。反射反応は計 20 種類の叩打刺激に対し、それぞれ発揮される筋電図の単収縮波形の最大振幅で比較を行った。実験の結果、速度、質量どちらの増加でも反射反応の大きさは増加するが、反射の出現閾値に関わるのは速度であり、一定速度以下では反射は出現しないことが示され、叩打速度は 1~2m/秒が必要であることが推察された。

**キーワード:** 伸張反射応答, 叩打速度, 叩打質量

## はじめに

伸張反射は筋紡錘を受容器とした脊髄反射である。筋紡錘は骨格筋中に存在し、錘外筋線維と平行に配列し、より細く短い錘内筋線維および紡錘鞘から成り立っている。錘内筋線維には比較的太く中央部が膨大した核袋線維と、比較的細く核が鎖状をなす核鎖線維とがある。これらの錘内筋線維の中央部には一次および二次終末という2種類の知覚終末があり、一次終末は太い Ia 群線維に由来し、二次終末は細い II 群線維に由来している。一次終末は核袋線維と核鎖線維両方の赤道中央部に、二次終末は主として核鎖線維の傍赤道部に分布している。筋を伸長すると知覚神経に求心性発射活動が生じるが、これには筋の長さに比例して発射活動を行う静的反応と、筋が伸張されている間、発射頻度が増加する動的反応がある。動的反応は伸張速度に比例し、主に Ia 群線維が関与している<sup>1,2)</sup>。

診察手技としての伸張反射検査は 1875 年に Erb と Westphal によって初めて報告された<sup>3)</sup>。その後臨床的な有用性はすぐに理解され、現在においても神経筋疾患の評価において広く用いられている。一般的に伸張反射の程度は消失、低下、正常、軽度亢進、中等度亢進、高度亢進等で表現されるが、その診断は視診に基づくもので主観的要素が強い。Dafkin ら<sup>4)</sup>は伸張反射の主観的評価は関節運動の大きさと強く相関していたと報告しているが、関節運動の大きさは様々な要因により変化し、特に叩打力によってその反射の強弱が変動しやすい。過去にはそうした評価のバラつきをなくすために腱への入力刺激と反射反応の大きさを定量的に評価している報告がみられる<sup>5-12)</sup>。入力の定量的測定法としては、圧電性の変換機や力センサー等を打腱器に取り付け、叩打力を測定したものが多くみられ<sup>5-10)</sup>、最も反射を検出しやすい叩打力や反射を誘発する閾値の力等が報告されている。

ところで、それらの報告では腱への叩打入力を力で表現しているが、力には質量と速度が大きく関係している。本来伸張反射は Ia 群線維が反射弓における知覚神経を司り、Ia 群線維は筋の動的伸張時に強い速度依存性の応答を示すため、単に叩打力だけでは質量と速度がどのように関与しているかが不明である。そこで本研究では、ハン

マーの質量と叩打速度を個別に変化させ、反射の出現閾値と大きさに両者がどのように関与するかについて検討することを目的とした。

## 対象と方法

### 被験者

被験者は筋・神経系に疾患既往をもたない男子大学生 20 名(年齢 21.2±0.4 歳, 身長 169.8±5.9cm, 体重 65.8±10.9kg)とした。実験に先立ち、被験者は研究目的・実験内容について十分な説明を受け、研究参加の同意書に署名した。

### 実験装置

伸張反射を起こすための叩打方法として、打腱器の質量と叩打速度を個別に変化できる装置を作成した(図 1)。本装置は C 型のアルミチャンネルを結合したレール型となっており、床から最高点までの高さが約 2.5m、横幅が約 1.4m、床から発射口の高さが約 0.8m である。レールの内側には中興化成工業のチューコーフローふっ素樹脂粘着テープを貼付し、摩擦抵抗を軽減した。

レール上を滑走させる重りは 20 g, 40g, 80g, 120 g の 4 種類とした。重りは C 型のアルミチャンネル上に打腱器のゴムの先端と銅板を積み、銅板の質量を変化させることで重量を調整した。重りの背面にもチューコーフローふっ素樹脂粘着テープを貼付した。

速度は 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0m/秒の 5 段階とし、それぞれの重りの落下させる高さを変えることで速度を調整した。速度の計測にはハイスピードデジタルカメラ(Casio Ex100PRO)を使用した。レール先端の打腱器発射口にカメラを設置し、発射口から 2cm もしくは 3cm まで飛び出す打腱器先端の動画を撮影し、動画を 1 フレーム 1 ミリ秒でコマ送り再生し時間計測を行い、その距離と経過時間から速度を推定した。

### 測定

反射反応の計測は P-EMG plus 表面筋電位計測装置(追坂電子機器)を用いて行い、被験筋は右の大腿直筋とした。電極貼付部は大腿前面で上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結ぶ線分の中央部とし、腱への叩打によって生じた筋電図の単収縮波形の最大振幅を測定した。



(A) (B)  
Figure 1. Tapping device that induces deep tendon reflex.  
(A) Rail component. (B) Weight that glides on the rail.

実験手順

被験者には足底が床につかない椅子上で安静座位を取らせ下腿を下垂させた。発射口と膝蓋腱の間は1横指とし、被験者の膝蓋腱部に打腱器の発射口が位置するように調整した。

叩打刺激は質量4種類、速度5段階の計20種類である。刺激順序は質量の重い順に行い、各重りについて速度の遅い順に施行した。計20種類の刺激に対し叩打刺激をそれぞれ3回ずつ実施し、その平均値を被験者の代表値とした。また、上位中枢からの抑制などによる反射の出現状態を統一するために各重りでの腱叩打の前に膝蓋腱に対する振動刺激を行った。振動刺激は市販のHandy vibe(大東電機工業株式会社)を使用し、76.6Hzで1分間行った<sup>11)</sup>。

分析方法

各被験者において全試行中の筋電図から得られた最大振幅の値を100%とし、各施行により得られたデータを正規化し%IEMGを得た。統計的検定として、一元配置分散分析を用い、各速度における%IEMG値の質量別比較と、各質量における%IEMG値の速度別比較を行った。

結果

1. 各質量、角速度毎の反射反応の大きさ

筋電波形の最大振幅で正規化した各質量、角速度毎の%IEMGの全被験者の平均値を図2に示す。質量の上昇と速度の上昇ともに反射は増強し右肩上がりの傾向を示した。

次に質量ごとの叩打速度による差と、叩打速度ごとの質量による差の一元配置分散分析を行った結果を表1に示す。その結果、全ての質量において速度による差は有意な結果が認められた。一

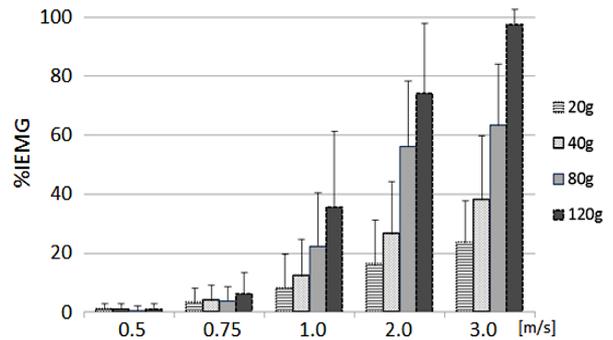


Figure 2. Mean %IEMG value according to tapping velocity and reflex hammer mass.

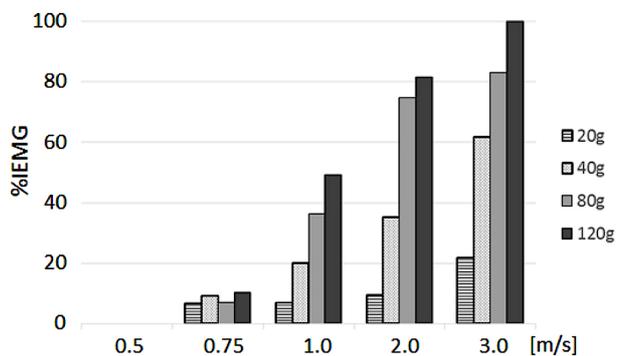


Figure 3. Typical example of %IEMG values when the tendon reflex appeared for various reflex hammer masses at a given velocity.

方、叩打速度ごとに質量による差がみられるか検討を行った結果、0.5m/秒と0.75m/秒では有意な差は認められなかったが、1.0m/秒、2.0m/秒、3.0m/秒では有意な差が認められた。

2. 反射の出現閾値

反射の出現閾値に着目すると、低速度では反射は出現せず、ある速度を境に全ての質量で反射が出現していた例が20例中8例であった。典型例を図3に示す。図3では0.5m/秒では全ての質量で反射は出現せず、0.75m/秒では全ての質量で出現した。8例のうち反射が初めてみられた速度は0.75m/秒が4例、1.0m/秒が3例、2.0m/秒が1例であった。また、0.5m/秒で全ての質量において反射が出現していた例が4例であった。

考察

今回、伸張反射の入力について叩打の質量と速度を個別に変化させ、反射反応の大きさと反射の出現閾値について検討を行った。

Table 1. Comparison of %IEMG values by velocity for each mass and by mass for each velocity

	Mass				ANOVA		
	20g	40g	80g	120g	F-value	p	
Velocity	0.5 m/s	0.7±2.0	0.7±2.1	0.6±1.6	0.9±2.0	0.10	ns
	0.75m/s	3.1±5.1	3.9±5.2	3.8±4.9	6.2±7.2	1.05	ns
	1.0 m/s	7.9±11.7	12.2±12.5	22.3±18.1	35.5±25.8	8.44	p<0.001
	2.0 m/s	16.0±15.0	26.3±18.0	56.2±22.2	74.2±23.7	32.14	p<0.001
	3.0 m/s	23.3±14.3	37.9±21.9	63.4±20.7	97.6±5.0	67.04	p<0.001
ANOVA	F-value	13.14	22.39	60.33	122.76		
	p	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001		

ANOVA, analysis of variance

## 1. 反射反応の大きさ

先行する伸張反射の入出力に関する定量的測定の結果では、叩打力の上昇とともに反射反応の大きさも上昇すると述べられている<sup>12,13)</sup>。しかしながら叩打力の定量的測定法は叩打力計測装置付きハンマーを用いているものが多く、その単位はニュートン[N]である<sup>8,10)</sup>。打腱器を振り子式に落下させ腱を叩打している先行研究もみられるが、落下角度と反射反応である関節運動の大きさには高い相関を示し、その根拠として落下角度の上昇により叩打速度が上昇し、それに伴い叩打する力[N]が上昇したためであると述べている<sup>12,13)</sup>。

今回、叩打入力について速度と質量のどちらが出力である反射の大きさに関与するかについて、一元配置分散分析を用いて検定を行った。各質量における%IEMG値の速度別比較では、全ての質量において速度による有意な差が認められた。しかしながら、叩打速度毎の質量別比較の結果、1.0m/秒以上の速度では質量による有意な差が認められたものの、0.5m/秒と0.75m/秒では有意な差は認められなかった(表1)。この結果より、質量は小さくても速度を上昇させれば反射反応は大きくなるが、速度が低速の場合、質量を増加させても反射反応は増強されないといえる。

反射反応の大きさは増員される $\alpha$ 運動神経の増加が反映され、またそれは発火するIa群求心性神経の増加に依存するといえる。筋紡錘は錘外筋と並行に位置し、その密度は筋によって異なるが上腕二頭筋では約320個あるといわれている<sup>15)</sup>。この筋紡錘をどれだけ興奮させることができる

かで反射反応の大きさは決定される。

本来、伸張反射に関与する知覚神経であるIa群線維は強い速度依存性の応答を示すことは古くから知られている<sup>2)</sup>。従って、質量の増加によって反射反応の大きさを増加させるには限度があり、今回の結果では、0.75m/秒以下の速度の叩打刺激ではIa群線維を発火させることができず、逆にそれ以上の速度であれば質量の増加だけでも増員されるIa群線維は増加し、反射反応は大きくなることが示唆された。

## 2. 反射出現閾値

次に各個人の反射反応の出現閾値について考察する。Zhangら<sup>7)</sup>は、脊髄損傷患者の反射出現の閾値は7[N]であったと報告し、Marshallら<sup>14)</sup>は、脊髄損傷者での閾値は4[N]であり、健常者では18[N]であったと述べている。しかし本研究において、質量が大きくても速度がある一定の値を超えないと反射が出現しない例が多数認められた。これは前述したようにIa群線維は速度依存性であるため、各被験者の筋紡錘が興奮する伸張速度の閾値をこえた叩打速度が必要であったと考えられる。今回の結果では、全ての質量において0.5m/秒で反射が出現していた例が4例、0.75m/秒が4例、1.0m/秒が3例、2.0m/秒が1例であった。Thamら<sup>12)</sup>は振り子によって腱を叩打する実験により、0.5m/秒では伸張反射は出現しにくいと述べているが、今回の結果からも個人差を踏まえ多くの症例に検査を行うことを考えると、1~2m/秒の速度が必要であると考えられる。

## 3. 研究の限界と今後の展望

本研究では伸張反射が速度依存性であることを踏まえ、伸張反射検査における叩打刺激を速度と質量に分けて反応を確認したが、筋紡錘は $\gamma$ 運動神経による遠心性支配を受けており、その興奮性は変化する。そのため同じ叩打刺激であっても個人内・個人間差異が存在し、誤差として現れる。したがって今後、興奮性を統一させるさらなる方法の検討や、個人差を含め階層的に分析する統計手法等を用いて検討を行っていきたい。

また、伸張反射の速度依存性はあくまでも筋の伸張速度に依存するが、実際の伸張反射検査では皮膚上を叩打し反射を引き起こすため、皮膚や脂肪組織など軟部組織の厚さとの反射反応の関係については今後の課題であり検討していく必要がある。

## 結語

本研究では伸張反射の叩打刺激を叩打速度と質量を個別に変化させ、反射反応の大きさと出現閾値に両者がどのように関与するのかについて検討を行った。速度、質量どちらの増加でも% IEMGは増加するが、反射出現の閾値に関わるのは速度であり、一定速度以下では反射は出現しないことが示された。過去の報告では反射を出現させる適切な叩打力を力の単位でだけ報告されていたが、それでは不十分であり、叩打速度は1~2m/秒が必要であることが示唆された。

## 文献

- 1) 藤井克彦, 赤沢堅造: 骨格筋の構造とそのモデル. 計測と制御. 18: 10-15, 1979.
- 2) 出崎順三: 筋紡錘の神経支配. 顕微鏡 45: 97-102, 2010.
- 3) Lanska DJ: The history of reflex hammers. Neurology. 39:1542-9,1989.
- 4) Chloe Dafkin, Andrew Green, Samantha Kerr, et al: The accuracy of subjective clinical assessments of the patellar reflex. Muscle Nerve. 47:81-88, 2013.
- 5) Chandrasekhar A, Abu Osman NA, Tham LK, et al: Influence of age on patellar tendon reflex response. PLOS One 8:e80799, 2013.
- 6) Stam J, van Crevel H: Measurement of tendon reflex by surface electromyography in normal subject. J Neurol. 236:231-237, 1989.
- 7) Zhang LQ, Huang H, James A, et al: System identification of tendon reflex dynamics. IEEE Trans Rehab Eng. 7:193-203, 1999.
- 8) Mamizuka N, Sakane M, Kaneoka K, et al: Kinematic quantitation of the patellar tendon reflex using a tri-axial accelerometer. J of Biomechanics. 40:2107-2111, 2007.
- 9) 小林達樹, 伊崎輝昌, 前山彰・他: 3軸加速度計を用いた膝蓋腱反射の定量的解析. 福岡大学記. 30:247-250, 2012.
- 10) Otaki Y, Mamizuka N, Fard M, et al: Identification of patellar tendon reflex based on simple kinematic measurement. J of Biomed Sci Eng. 4:265, 2009.
- 11) 中林紘二, 兒玉隆之, 水野健太郎・他: 振動刺激による下腿三頭筋の筋緊張抑制効果. 理学療法科学 26:393-396, 2011.
- 12) Tham LK, Abu Osman NA, Wan Abas WA, Lim KS: The validity and reliability of motion analysis in patellar tendon reflex assessment. PLoS One. 8:e55702, 2013.
- 13) Tham LK, Abu Osman NA, Wan Abas WA, Lim KS: Motion analysis of normal patellar tendon reflex. Can J Neurol Sci. 40:836-841, 2013.
- 14) Marshall GL, Little JW. Deep tendon reflexes: a study of quantitative methods. J Spinal Cord Med. 25(2):94-9. 2002.
- 15) 伊藤文雄, 樊小力, 吉村篤司・他: 脊椎動物における筋伸張受容器. 動物生理 1:98-106, 1984.