

■ 原著

# 疲労する筋の違いが健常若年者の膝関節位置覚に 及ぼす影響

The effect of fatigued muscle to the joint position sense  
of normal knee in young male

佐々木賢太郎<sup>1)</sup> 山本康盛<sup>2)</sup>

Kentaro Sasaki<sup>1)</sup> Kousei Yamamoto<sup>2)</sup>

1) 金城大学医療健康学部理学療法学科：石川県白山市笠間町 1200  
TEL076-276-4400 FAX076-275-4316

1) Department of Physical Therapy, Kinjo University : 1200 Hakusan city, Ishikawa 924-8511,  
Japan. TEL+81-76-276-4400

2) 医療法人社団和楽仁芳珠記念病院リハビリテーション科

2) Department of Rehabilitation Medicine, Houju Memorial Hospital

保健医療学雑誌 3 (1): 42-47, 2012. 受付日 2011 年 12 月 1 日 受理日 2012 年 1 月 13 日

JAHS 3 (1): 42-47, 2012. Submitted Dec. 1, 2010. Accepted Jan. 13, 2012.

**ABSTRACT:** The aim of this experiment was to examine the difference of fatigued muscle to joint position sense (JPS) of normal knee in the direction of extension. Twenty male subjects were participated in this experiment. JPS was evaluated by dynamometer. Right leg was moved passively to the target angle ( at 10° and 50° of knee flexion) with 15 angular velocity from starting position of 90° flexion in three times. After passive motion, subject repositioned the target angle actively in three times. The accuracy in JPS was evaluated by the error, which was determined as the mean value of difference between the target angle and active repositioned angle in three times. The fatigue conditions were set for knee extensor and flexor. As a result, the error in knee flexor was not significant between pre and post fatigue in both target angles of 10° and 50° while error in post fatigue was significantly increased compared with pre fatigue in knee extensor. This result suggests that the fatigue of agonist repositioned target angle would affect the accuracy in JPS, but antagonist muscle would not.

**Key words:** normal knee joint, joint position sense, muscle fatigue

**要旨：** 健常若年男性 20 名を対象として、疲労筋の違いが膝関節伸展方向の位置覚の精度に及ぼす影響について検討した。関節位置覚の測定は膝伸展方向に 3 回の他動運動（角速度 15° /s）を反復して標的角度を提示した後、被検者自身が 3 回の自動運動で再現し、その誤差平均を位置覚の精度とした。疲労条件は標的角度を再現する膝伸筋群と、その拮抗筋となる膝屈筋群の 2 条件を設定した。結果、膝伸筋群の疲労条件では疲労前に比べて疲労後の位置覚誤差に有意な変化が認められた。一方、膝屈筋群では疲労前後の誤差に変化は認められなかった。本結果より、標的角度を再現する筋の疲労は正常膝関節の位置覚誤差に影響を及ぼすが、その拮抗筋の疲労は関節位置覚の精度には影響が小さいことが示唆された。

**キーワード：** 正常膝関節、関節位置覚、筋疲労

## はじめに

‘proprioception (固有感覚)’は、四肢、体幹の動きを感知する関節運動覚と、空間における位置(角度)を知覚する関節位置覚に大別される<sup>1)</sup>。関節運動覚は受動的な動きを感知し、中枢神経系へのフィードバックを介した筋収縮によって関節を保護する。一方、関節位置覚は空間内における四肢、体幹の位置(角度)を感知することで運動出力の調整を図り、協調性に関与する。特に、関節位置覚は新たな技能の獲得や向上あるいは困難となった動作の再獲得といったリハビリテーション領域において重要な役割を担う。

固有感覚に関与する受容器は数多く知られているが、中でも皮膚受容器(Merkel disc, Ruffini endings)とともに筋紡錘がその中心的な役割を担うとされている<sup>1,2)</sup>。proprioception とほぼ同義語で使用される‘Kinaesthesia (筋覚)’という言葉があるように、筋肉は効果器としてだけでなく、古くから固有感覚の受容器として認識されてきた<sup>1)</sup>。筋紡錘二次感覚終末は筋長のみ感知であるため関節位置覚のみを受容しているのに対し、一次感覚終末は筋長に加えて伸張速度を受容するため関節位置覚とともに関節運動覚の受容にも関与する<sup>3)</sup>。先行研究において、ウォーミングアップ<sup>4)</sup>や中等度負荷の自転車駆動<sup>5)</sup>によって固有感覚の精度が向上することが報告されているが、これは適度な運動負荷によって筋紡錘の感度が向上するためであると考えられている。一方、過剰な運動負荷によって生ずる筋疲労は筋紡錘の感度を低下させ、筋出力だけでなく、固有感覚の精度までも低下させる。そのため、筋疲労は競技中の技能低下やけが、あるいはリハビリテーションにおける動作再獲得の障壁となる。過去の研究において、疲労が正常膝関節の位置覚に及ぼす影響についてはすでに検討されており<sup>6,7,8,9,10)</sup>、疲労は関節位置覚の精度を悪化させるという見解で一致している。また、関節不安定性は固有感覚の低下と関連する<sup>6)</sup>が、筋疲労もまた関節不安定性を惹起して固有感覚の低下を招来することも報告されている<sup>11)</sup>。これらの先行研究では、全身運動によって疲労を起こさせたものが多く、骨格筋のみに焦点を当てて疲労を起こさせた研究は少ない。関節位置覚の受容には筋紡錘が大きく関与する<sup>1,2)</sup>ため、全身疲労よりも筋疲労として

関節位置覚に及ぼす影響を検討する方が、筋の受容器としての機能をより明らかにすることができる。と考える。

関節位置覚の測定方法は、他動、もしくは自動運動により目的とする角度(標的角度)を提示、教示された後、記憶した標的角度を自動運動で再現するのが一般的である。標的角度を再現する主動筋が求心性に収縮する時、その拮抗筋が伸張され筋紡錘が発火する。拮抗筋の筋紡錘の発火は関節位置覚の大きな手がかりとなることが知られており<sup>12,13)</sup>、ヒトは主として拮抗筋の筋紡錘の伸張程度によって関節の位置(角度)を認識していると考えられている。この仮説が正しければ、標的角度を再現する主動筋が疲労するよりも、拮抗筋に疲労が生じた場合に関節位置覚の精度は低下することとなる。過去の検討において、主動筋と拮抗筋、それぞれの筋疲労が関節位置覚の精度に及ぼす影響について検討されたものはない。本研究では健常若年者の膝関節を対象として、膝伸筋群、屈筋群、それぞれ単独の筋疲労が膝伸展方向の関節位置覚の精度に及ぼす影響について検討することを目的とした。

## 対象と方法

### 対象

膝関節に疾患、既往のない健常男性 20 名(平均年齢: 21.9±0.9 歳, body mass index: 22.5±2.2kg/m<sup>2</sup>)を本研究の対象とした。全対象に本研究の目的と方法を十分に説明し、研究参加への同意を得た。なお、本研究は金城大学倫理審査委員会の承認を得て行った。

### 方法

膝関節の位置覚の測定には、等速性運動機器サイバックスノルム(メディカ株式会社製)を用いた。被検側は右膝関節とした(被検者は全例右利きであった)。被検者はショートパンツ、裸足にて装置椅子に坐った。被検者にはアイマスクを、右足部にはエアスプリントを装着し、視覚や足部周囲の感覚を遮断した。また、大腿後面の皮膚が坐面に直接当たらぬようにショートパンツの裾を坐端に合わせ、さらにバックレストに背中が接触しないように指示した。測定時には、被験者の膝窩部が坐面に接触しないように坐面端から 2 横

指の距離を保った位置に腕を組んで着坐し、左足は床面につかないようにした。矢状面における右膝関節の中心にダイナモメーターの軸を合わせ、脛骨内果から4横指のところで足部のベルトをエアスプリントの上から固定した (Figure 1)。

上記の設定が完了した後、関節位置覚の計測を開始した。膝関節 90° 屈曲位から 15° /s の角速度で下腿を標的角度まで他動的に伸展し、そこで3秒間保持した後、90° 屈曲位まで戻る、この屈伸を3回繰り返して、標的角度を記憶した。その後、検者の合図で3回の自動運動により標的角度を再現した。標的角度と再現角度の誤差を関節位置覚の精度とし、3回の誤差平均を算出した。記録方法として、標的角度より再現角度が不足した場合、いわゆる undershoot を「-」、逆に標的角度を超えて再現した overshoot の場合を「+」として記録した。なお、予備実験で得られた角速度 15° /s の級内相関係数(1, 1)は 0.76 である。実施に際し、十分説明し、デモンストレーションを行ってから測定を開始した。



Figure 1 The measurement of joint position sense in knee joint

Subjects sat on the dynamometer's seat with air splint on right foot and eye mask. Right leg was moved passively to the target angle with 15 angular velocity from starting position of 90° flexion in three times. After passive motion, subject repositioned actively to the target angle in three times.

標的角度は 10° と 50° の 2 条件を選択した。施行順序は、被験者によってランダムに行った。

疲労条件として、膝伸筋群と屈筋群の 2 条件を設定した。筋疲労を起こさせる運動負荷として膝関節伸展、あるいは屈曲の等速性運動 (300° /s) を行った。本研究では筋疲労の判断基準を、膝伸筋群には等速性運動中の最大伸展ピークトルクの 33%以下に 5 回連続してトルクが低下した場合、膝屈筋群は最大屈曲ピークトルクの 50%以下に 5 回連続してトルクが低下した場合とした (予備実験より、膝屈筋群では最大屈曲ピークトルクの 33%以下にまで疲労を起こさせるには運動回数が非常に多くなり、被験者の身体的、精神的負担が大きくなったため、疲労の判断基準を 50%に変更した)。疲労条件の施行順序は被験者によってランダムに施行し、1 週間以上の間隔をあけて主観的な疲労が除去されたことを確認してもう一方の条件を実施した。なお、筋電計を用いて被験者 3 名に対して行った予備実験より、いずれの疲労条件においても被験者全員に中間周波数の徐波化が認められ、本研究における疲労の判断基準が妥当であることを確認した。さらに、1 週間後にはその周波数が回復していたことから施行間隔の妥当性についても同時に確認した (Table 1)。

統計学的検討として、膝伸筋群と屈筋群の疲労条件それぞれにおいて、2 角度条件の疲労前後の誤差を対応のある t 検定を用いて検討した。また、筋疲労が起こるまでの反復回数についても同様の手法で検討した。統計解析ソフト PASW statistics 18.0 を使用し、全て 5%水準にて有意判定を行った。

Table1 The change in median frequency ( preliminary study )

	subject A	subject B	subject C
<b>extensors fatigue</b>			
pre-fatigue	60.6	55.8	57.8
post-fatigue	54.5	40.3	45.8
1week later	62.0	62.3	66.6
<b>flexors fatigue</b>			
pre-fatigue	58.3	45.2	57.4
post-fatigue	52.7	41.4	50.3
1week later	56.0	47.3	60.3

Table2 The change in joint position sense between pre and post fatigue

	10°		50°	
	pre-fatigue	post-fatigue	pre-fatigue	post-fatigue
extensors fatigue ( ° )	-10.5 ± 5.8	-8.4 ± 6.1 *	3.7 ± 6.4	5.9 ± 7.2 *
flexors fatigue ( ° )	-9.9 ± 7.4	-9.6 ± 8.7	5.4 ± 7.9	6.0 ± 7.7
average ± SD				* p<0.05

## 結果

運動負荷について、筋疲労するまでの運動反復回数は、膝伸筋群が  $64.4 \pm 14.7$  回、屈筋群  $69.8 \pm 24.4$  回で、2 条件間に差は認められなかった。

膝伸筋、屈筋、いずれの疲労条件においても、疲労前の再現角度は  $10^\circ$  条件で標的角度に満たない undershoot、逆に  $50^\circ$  条件では標的角度を超える overshoot を示した (Table 2)。

膝伸筋群の疲労前後の比較では、 $50^\circ$  条件において疲労後の誤差は有意に増加した ( $p < 0.05$ ) のに対し、 $10^\circ$  条件では疲労前に比べて疲労後は有意に誤差が減少した ( $p < 0.05$ )。一方、膝屈筋群の筋疲労条件では、2 角度条件とも筋疲労前後で有意な変化は認められなかった (Table 2)。

## 考察

疲労が膝関節位置覚の精度を低下させることは多くの研究によって示されている<sup>6,7,8,9,10</sup>。しかし、疲労筋の違いが関節位置覚の精度に及ぼす影響について検討されたものは見当たらない。特に、標的角度を再現する際に伸張される拮抗筋の疲労が関節位置覚に与える影響について検討されたものはない。本研究の結果では、標的角度を再現する主動筋となる膝伸筋群の筋疲労は関節位置覚の精度に影響を及ぼしたが、拮抗筋である膝屈筋群の筋疲労ではいずれの角度条件においても有意な変化が認められなかった。このことから、関節位置覚の精度は拮抗筋よりも標的角度を再現する主動筋の筋紡錘やゴルジ腱器官からのフィードバックにより強く依存する可能性が示された。随意収縮（求心性収縮）中の筋紡錘は錘外筋とともに短縮はしない。 $\alpha$ ニューロンの発火により錘外筋が収縮する時、同時に $\gamma$ ニューロンの支配を受ける錘内筋もまた収縮し、それによって筋紡錘の長さ（感度）は常に調節されている<sup>14</sup>。この $\alpha$ ニューロンと $\gamma$ ニューロンの co-activation については、最大筋力の 20-25% の収縮でほとんどの筋紡錘が発火することが明らかにされている<sup>15</sup>。この作用により、収縮筋の「筋長」は「角度」として中枢神経系にフィードバックされ、標的角度の再現時には記憶された角度と照合されて調節される。本研究では標的角度を他

動運動で提示したが、検者の指示に従って標的角度を自動運動で記憶した場合、標的角度を認識する上で主動筋の筋紡錘から得られる筋感覚は大きな手がかりとなるため、再現角度の誤差は減少することが予想される。実際、Winter ら<sup>3</sup>の肘関節を対象とした研究において、標的角度の提示時に前腕を介助して提示すると、介助しない（自動運動）条件に比べて、再現角度の誤差が増大することが報告されている。同様に、再現方法についても、他動運動よりも自動運動で再現の方が関節位置覚の精度が向上することが股関節を対象とした研究で明らかにされている<sup>16</sup>。これらの先行研究と本結果を統合すると、標的角度を再現する主動筋の筋紡錘が関節位置覚の精度に大きく関与することが示唆された。ただし、屈筋群の疲労条件は最大ピークトルクの 50% をもって疲労とみなしたため、反復回数には差がなかったものの伸筋群と全く同等の疲労状態であったとは断定できない。今後、筋疲労の定義については再度、検討する必要がある。

膝伸筋群の筋疲労の結果では、 $10^\circ$  条件で疲労後の位置覚誤差が減少し、逆に  $50^\circ$  条件では疲労後の誤差が有意に増大するという矛盾した結果が得られた。 $50^\circ$  条件の結果は、筋疲労により関節位置覚の精度は低下するとした過去の研究結果を支持するものであった。しかし、 $10^\circ$  条件の結果は筋疲労により関節位置覚の精度が改善すること示しており、そのような結果を報告した研究は過去にない。この要因として考えられる生理学的機序は、筋疲労時の筋長の誤認識である。Givoni ら<sup>17,18</sup>は筋疲労の実験から、疲労筋は実際の筋長よりも長く認識されることを明らかにしている。 $10^\circ$  条件における膝伸筋群の疲労前の再現角度は標的角度に満たない undershoot であった。疲労後の標的角度を再現する際に、主動筋である膝伸筋群の疲労によってその筋が実際長よりも長く認識されたため、膝伸筋群をさらに収縮させて標的角度とのマッチングを図った可能性がある。すなわち、疲労前から再現角度は undershoot であったものが、疲労後に筋長を長く誤認したことでさらに膝伸筋群を収縮させて標的角度を再現したため、結果として誤差が減少したのではないかと推察する。膝伸筋群の疲労条件

では 50° 条件においても疲労前から再現角度は overshoot であったが, 疲労後にさらに overshoot の傾向は増大しており, 筋疲労後に同様の誤認識が生じた可能性が高い. 疲労筋が実際長よりも長く誤認されてしまう機序については明らかにされていない. この現象は主動筋の疲労において認められたが, 疲労するほどの反復運動によって収縮筋の筋紡錘からの求心性入力が高まり, それは運動後の標的角度を再現する際にも収縮感覚(筋覚)として残存したため, 疲労後の再現角度は運動(収縮)方向へ変位したのかもしれない. すなわち, 主動筋の疲労は再現角度の運動(収縮)方向に影響を及ぼし, 関節位置覚の誤差に影響を与えている可能性がある. 筋の収縮感覚と関節位置覚の関連性を明らかにするためにはさらなる検討が必要である.

#### 文献

- 1) Proske U, Gandevia SC: The kinaesthetic senses. *J Physiol* 587: 4139-4146, 2009.
- 2) Wise AK, Gregory JE, Proske U: The effects of muscle conditioning on movement detection thresholds at the human forearm. *Brain Research* 735: 125-130, 1996.
- 3) Winter JA, Allen TJ, Proske U: Muscle spindle signals combine with the sense of effort to indicate limb position. *J Physiol* 568: 1035-1046, 2005.
- 4) Bartlett MJ, Warren PJ: Effect of warming up on knee proprioception before sporting activity. *Br J Sports Med* 36: 132-134, 2002.
- 5) Bouët V, Gahéry Y: Muscular exercise improves knee position sense in humans. *Neurosci Lett* 289: 143-146, 2000.
- 6) Skinner HB, Wyatt MP, Hodgdon JA, et al: Effects of fatigue on joint position sense of the knee. *J Orthop Res* 4: 112-118, 1986.
- 7) Skinner HB, Barrack RL: Joint position sense in the normal and pathologic knee joint. *J Electromyogr Kinesiol* 1: 180-190, 1991.
- 8) Lattanzio PJ, Petrella RJ, Sproule JR, et al: Effects of fatigue on knee proprioception. *Clin J Sports Med* 7: 22-27, 1997.
- 9) 三浦和知, 福田道隆, 近藤和泉, 他: 膝関節の固有感覚に対する筋疲労の影響について. *東北整災紀要* 42: 105-108, 1998
- 10) Ribeiro F, Mota J, Oliveira J: Effect of exercise-induced fatigue on position sense of the knee in the elderly. *Eur J Appl Physiol* 99: 379-385, 2007.
- 11) Hall MG, Ferrell WR, Sturrock RD, et al: The effect of the hypermobility syndrome on knee joint proprioception. *Br J Rheumatol* 34: 121-125, 1995.
- 12) Inglis JT, Frank JS: The effect of agonist/antagonist muscle vibration on human position sense. *Exp Brain Res* 81: 573-580, 1990.
- 13) Inglis JT, Frank JS, Inglis B: The effect of muscle vibration on human position sense during movements controlled by lengthening muscle contraction. *Exp Brain Res* 84: 631-634, 1991.
- 14) Allen TJ, Ansems GE, Proske U: Evidence from proprioception of fusimotor coactivation during voluntary contractions in humans. *Exp Physiol* 93: 391-398, 2008.
- 15) Proske U: Kinesthesia: The role of muscle receptors. *Muscle & Nerve* 34: 545-558, 2006.
- 16) Pickard CM, Sullivan PE, Allison GT, et al: Is there a difference in hip joint position sense between young and old groups? *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 58: 631-635, 2003.
- 17) Givoni NJ, Pham T, Allen TJ, et al: The effect of quadriceps muscle fatigue on position matching at the knee. *J Physiol* 584: 111-119, 2007.
- 18) Allen TJ, Leung M, Proske U: The effect of fatigue from exercise on human limb position sense. *J Physiol* 588: 1369-1377, 2010.