

## 筋疲労による主動筋および拮抗筋脊髄運動ニューロン興奮性の変化 — 誘発筋電図H波およびM波からの分析 —

王 国祥<sup>1)</sup>, 大成浄志<sup>2)</sup>, 川口浩太郎<sup>2)</sup>, 金子文成<sup>3)</sup>, 趙 金花<sup>1)</sup>

1) 広島大学大学院医学系研究科

2) 広島大学医学部保健学科

3) 独立行政法人産業技術総合研究所

受付 平成13年11月1日

受理 平成14年1月21日

本研究では、筋疲労に伴う主動筋および拮抗筋脊髄運動ニューロン興奮性の変化を明らかにするため、等尺性足関節底・背屈運動前後のヒラメ筋H波およびM波の経時的な変化を観察した。対象は健康な男子10名とし、最大随意筋収縮(MVC)の50%の足関節等尺性運動を行った。その結果、(1)底屈運動によるヒラメ筋の疲労後、Hmax/Mmax(最大H波とM波の振幅比)は、安静時と比較して $57.37 \pm 12.97\%$ に低下し、この低下は運動終了30分後においても $74.90 \pm 10.89\%$ であった。このことから、筋疲労に伴い、筋を支配する脊髄運動ニューロンが長時間抑制されることが示唆された。(2)背屈運動による前脛骨筋の疲労後、拮抗筋であるヒラメ筋のHmax/Mmaxが、安静時と比較して $70.13 \pm 8.85\%$ に低下した。運動終了後、徐々に回復し、8分程で安静時のレベルに回復した。(3)前脛骨筋の疲労後、拮抗筋であるヒラメ筋のHthr(H波閾値)は安静時と比較して有意に増加した。(2)と(3)により、主動筋の疲労によって、主動筋のみならず運動を行っていない拮抗筋脊髄運動ニューロンも抑制を受けていることが明らかになった。

**Key words:** 筋疲労, 拮抗筋, 運動ニューロン, H波

筋疲労に伴う最大随意筋力の低下は多くの生理学的機序が複雑に絡み合って生じることが知られている。すなわち、脳での筋力発揮指令の量的な低下<sup>28)</sup>、主動筋における脊髄運動ニューロン興奮性の低下もしくは抑制性の増大<sup>4,13,22)</sup>、神経筋接合部不全<sup>26)</sup>および末梢感覚器からの求心性入力の変化<sup>5,23)</sup>等が報告されている。これらの中で、脳からの下行性運動指令と末梢感覚器官からの求心性入力を整理・統合する脊髄反射機構が持つ意義は大きい。筋疲労による脊髄反射機構への影響に関する研究は、ヒトの脊髄反射電位—H波(Hoffmann reflex)または動物実験で脊髄単シナプス反射法を応用することにより数多く行われ、その筋を支配する運動ニューロンの興奮性が低下すると報告されている<sup>2,7,13)</sup>。また、Haywardら<sup>14)</sup>は除脳ネコにおいて内側腓腹筋を選択的に電気刺激することにより筋を疲労させた後、収縮させていなかったヒラメ筋の筋力も低下することを報告している。この協同筋として

のヒラメ筋の反射抑制は、疲労した内側腓腹筋の求心性入力と、Renshaw細胞の活動に由来するものであるが、筋からの求心性インパルスに依存するところが大きいと推察されている。

収縮筋のIa群線維からの求心性インパルスが、同名筋と協同筋の運動ニューロンに興奮作用を及ぼすとともに、拮抗筋の運動ニューロンを抑制して相反抑制を形成する<sup>20)</sup>。これは、関節を一定角度に保持するため、主動筋が収縮する際に、拮抗筋の弛緩を引き起こす神経反射機構として知られている。しかし、主動筋に筋疲労が生じた場合、相反抑制が働かない可能性があり、肉離れのような筋損傷を起こす原因の一つであると考えられる。一方、古くから疲労による動作反復速度の低下や、不規則性の増大などは、相反抑制のような神経反射回路の失調により巧緻動作を遂行することが困難になった結果であると推測されている<sup>17)</sup>。しかし、筋疲労により相反抑制を起こす神経反射回路の

活動性や拮抗筋運動ニューロン群の興奮性がどのような影響を受けるかについては、未だ明らかにされていない。

そこで本研究では、足関節底屈および背屈運動による筋疲労前後のヒラメ筋 H 波および M 波の変化を経時的に観察し、筋疲労中の主動筋および拮抗筋運動ニューロン興奮性の変化を明らかにすることを目的とした。

## 対象と方法

### 1. 被験者および運動課題

被験者は健康な男性10名(年齢 $25.2 \pm 3.9$ 歳)とし、測定筋はヒラメ筋と前脛骨筋とした。まず、筋力測定装置 BIODEX SYSTEM 3 (Biodex 社製)を用いて、足関節底屈・背屈の最大随意筋力 (Maximal Voluntary Contraction, MVC) を測定した。測定肢位は測定側の膝を屈曲角度が $30^\circ$ となるように、大腿部をベルトで椅子に固定し、足関節は金属のフットプレートに固定した。ヒラメ筋の持続的な等尺性収縮による足関節底屈運動は足関節 $0^\circ$ で行わせ、前脛骨筋の持続的な等尺性収縮による足関節背屈運動は足関節底屈 $30^\circ$ から行わせた。MVC の測定は、ウォーミングアップとして軽い数秒間の等尺性足関節底背屈運動を3回行わせ、さらに最大努力で等尺性足関節底屈もしくは背屈運動を行った。運動課題は MVC 測定と同一肢位で、足関節底屈もしくは足関節背屈の最大筋力の50%、すなわち50% MVC の運動強度での持続的な足関節底屈または背屈運動とした。この場合、被験者自身に発揮筋力をモニタリングさせ、50% MVC の筋力を維持させた。運動課題終了は50% MVC の維持が不可能となった時点とした。ヒラメ筋と前脛骨筋の測定は2日以上の間隔をおいて行った。

### 2. 筋電図の記録

筋電図の導出は表面電極 (blue sensor

MEDICOTEST A/S) を用い、ヒラメ筋内側頭の筋腹部および前脛骨筋筋腹に置き、双極誘導法にて行い、電極の中心距離を約 2 cm とした。筋電図は時定数0.01秒、高周波遮断域 2 kHz にて生体アンプ (Bio Amp ML132, AD Instruments) により増幅し、サンプリング周波数 5 kHz で、A/D 変換器 (MacLab 8s, AD Instruments Pty Ltd) を介して、パーソナルコンピュータに取り込んだ。H 波と M 波 (compound muscle action potential) は、足関節底屈運動課題 (底屈課題) の場合、膝窩部の脛骨神経を経皮的に 0.3 Hz, 1 ms 幅の矩形波で電気刺激することによりヒラメ筋から導出した。刺激装置は、ELCTRONIC STIMULAOR 3F46 (三栄測器社製) を用いた。刺激電極の陰電極は、直径 5 mm のボルトをゴムブロックに頭部のみ出して埋め込んだ自家製電極を用い、最も低い強度でH波が導出可能な膝窩部に粘着テープで固定した。陽電極は、表面電極を用いて、陰電極より約 2 cm 遠位部に置いた。足関節背屈運動課題 (背屈課題) の場合には、底屈課題と同じ方法を用い、脛骨神経の刺激により、ヒラメ筋から H 波と M 波を導出し、拮抗筋運動ニューロン興奮性として評価した。

また、収縮筋の疲労現象および拮抗筋の収縮の有無を確認するため、足関節底屈または背屈運動中のヒラメ筋と前脛骨筋の表面筋電図の変化を観察した。

### 3. H 波および M 波測定のプロトコール

Fig. 1 には、運動課題の流れと H 波および M 波の記録のタイミングを示した。まずコントロールとして、運動前の安静状態での最大H波 (以下、Hmax) および最大上 M 波 (以下、Mmax) を記録し、その振幅値を計測した。次に運動開始から筋疲労にて運動終了するまで1分毎に、同様の方法で Hmax のみ記録した。さらに、運動終了直後から10分後まで1分毎に Hmax および Mmax を記録した。その後は15分後、20分後、30分後にも Hmax および Mmax を記録した。得られ

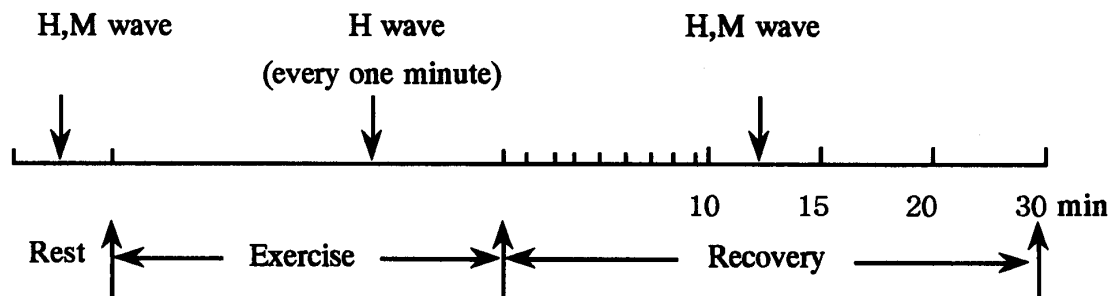


Fig. 1. Experimental procedure for recording of H wave and M wave.

た各時点での Hmax および Mmax の 5 回の振幅値を平均し、安静時の値を 100% として相対値を算出した。

また、安静状態と運動終了直後に導出した H 波出現の閾値強度（以下、Hthr）および M 波出現の閾値強度（以下、Mthr）も記録した。Hthr の判定は、Hmax から次第に刺激強度を下げて、連続的刺激により導出した最小 H 波の導出率が 50% となる刺激強度を H 波出現の最小強度をとし、Hthr と判断した<sup>11)</sup>。

#### 4. データ処理

##### 1) 表面筋電図

50% MVC での底屈課題および背屈課題を行った主動筋から記録された表面筋電図波形を全波整流し、運動課題開始から 10 秒間 (Start-50% MVC) と筋疲労にて運動課題が終了する直前の 10 秒間 (End-50% MVC) の筋電図を選択して、積分値を求めた。筋電図の周波数は、512 ポイントをハミング窓関数で高速フーリエ変換し、積分値を算出した運動課題開始、および運動終了直前の 10 秒間の平均周波数も求めた。得られた各 10 秒間の積分値と平均周波数の平均値の差の検定には、対応のある t 検定を用いた。

##### 2) H 波および M 波

連続的に記録した 5 回の Hmax と Mmax の経時的変化については、一元配置分散分析にて検定を行った。運動前安静時と運動終了直後の Hthr および Mthr の相対値（それぞれ安静時の値を 100% とした）の検定には、対応のある t 検定を用いた。各データは平均値と標準偏差で示した。

統計処理には、Stat View-J5.0 を使用して、いずれも有意水準は 5% として検定を行った。

### 結 果

#### 1. 筋疲労前後表面筋電図の変化

Table 1 には、50% MVC での足関節底屈運動によるヒラメ筋および背屈運動による前脛骨筋の運動開始から 10 秒間と運動終了直前の 10 秒間で得られた表面筋電図の積分値と平均周波数を示した。運動開始直後

と比較して運動終了直前の両筋の筋電図積分値は有意に大きくなり ( $p < 0.05$ )、平均周波数は有意に低くなった ( $p < 0.01$ )。

#### 2. 底屈課題におけるヒラメ筋（主動筋）H 波振幅の変化

足関節底屈運動時のヒラメ筋 Hmax, Mmax の典型的な経時的変化を Fig. 2-A に示した。ヒラメ筋の Hmax は時間の経過に伴い増加したが、筋疲労にて運動終了 2 分前には減少に転じる現象が認められた。この現象は各被験者間に量的な差はあったものの、全被験者で同様な傾向が認められた。また、筋疲労後の Mmax は変化しなかった。

Fig. 2-B には、足関節底屈運動前および回復期の全被験者のヒラメ筋 Hmax/Mmax の経時的変化を示した。足関節底屈運動終了直後に Hmax/Mmax は、安静時と比較して  $57.37 \pm 12.97\%$  に有意に低下した ( $p < 0.01$ )。さらに、この低下は運動終了後も続き、30 分後においても  $74.90 \pm 10.89\%$  であった ( $p < 0.01$ )。

#### 3. 背屈課題におけるヒラメ筋（拮抗筋）H 波振幅の変化

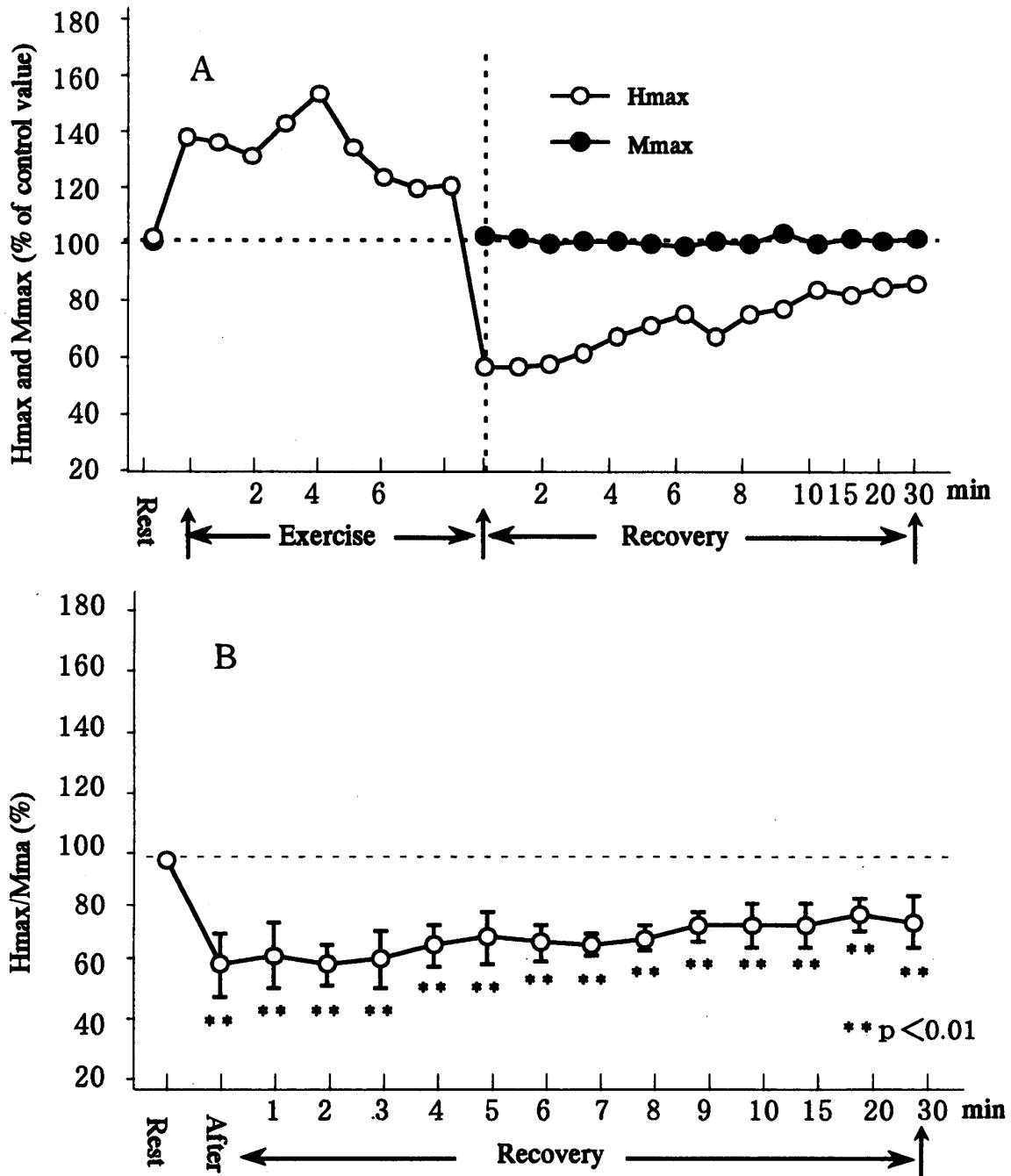
足関節背屈運動時のヒラメ筋 Hmax, Mmax の典型的な経時的変化を Fig. 3-A に示した。足関節背屈運動開始直後、拮抗筋であるヒラメ筋の Hmax は 42.74% に低下した。その後、運動時間の経過に伴い、H 波はさらに減少し、運動終了直前には 25.7% となった。筋疲労により足関節背屈運動を終了すると、直ちに Hmax は上昇したが、安静時のレベルにまで回復したのは運動終了後約 10 分後であった。なお、Mmax は主動筋と同様に変化しなかった。

Fig. 3-B には、足関節背屈運動前および回復期の全被験者のヒラメ筋 Hmax/Mmax の経時的変化を示した。足関節背屈運動終了直後、拮抗筋であるヒラメ筋の Hmax/Mmax は、安静時と比較して  $70.13 \pm 8.85\%$  に有意に低下した ( $p < 0.01$ )。その後徐々に回復がみられたが、7 分後までは安静時に比較して有意に低下していた ( $p < 0.05$ )。

**Table 1.** Change of electromyogram in the plantarflexion and dorsiflexion.

agonist	duration (s)	integrated EMG (mV · s)		mean frequency (Hz)	
		start-50% MVC	end-50% MVC	start-50% MVC	end-50% MVC
M. tibialis anterior (n=10)	420.8 ± 134.4	0.443 ± 0.20	0.653 ± 0.23*	73.17 ± 6.93	43.24 ± 13.56**
M. soleus (n=10)	330.8 ± 123.1	0.532 ± 0.21	0.614 ± 0.24*	60.65 ± 5.74	44.33 ± 7.23**

mean ± SD \* $p < 0.05$  \*\* $p < 0.01$



**Fig. 2.** Change of H wave amplitude of the muscle fatigue before and after where the soleus muscle becomes an agonist.

One example of the typical subject Hmax and Mmax in Fig. 2-A.

Mean and standard deviations of the Hmax/Mmax of ten subjects in Fig. 2-B.

**4. 底屈課題および背屈課題前後のヒラメ筋 H 波閾値の変化**

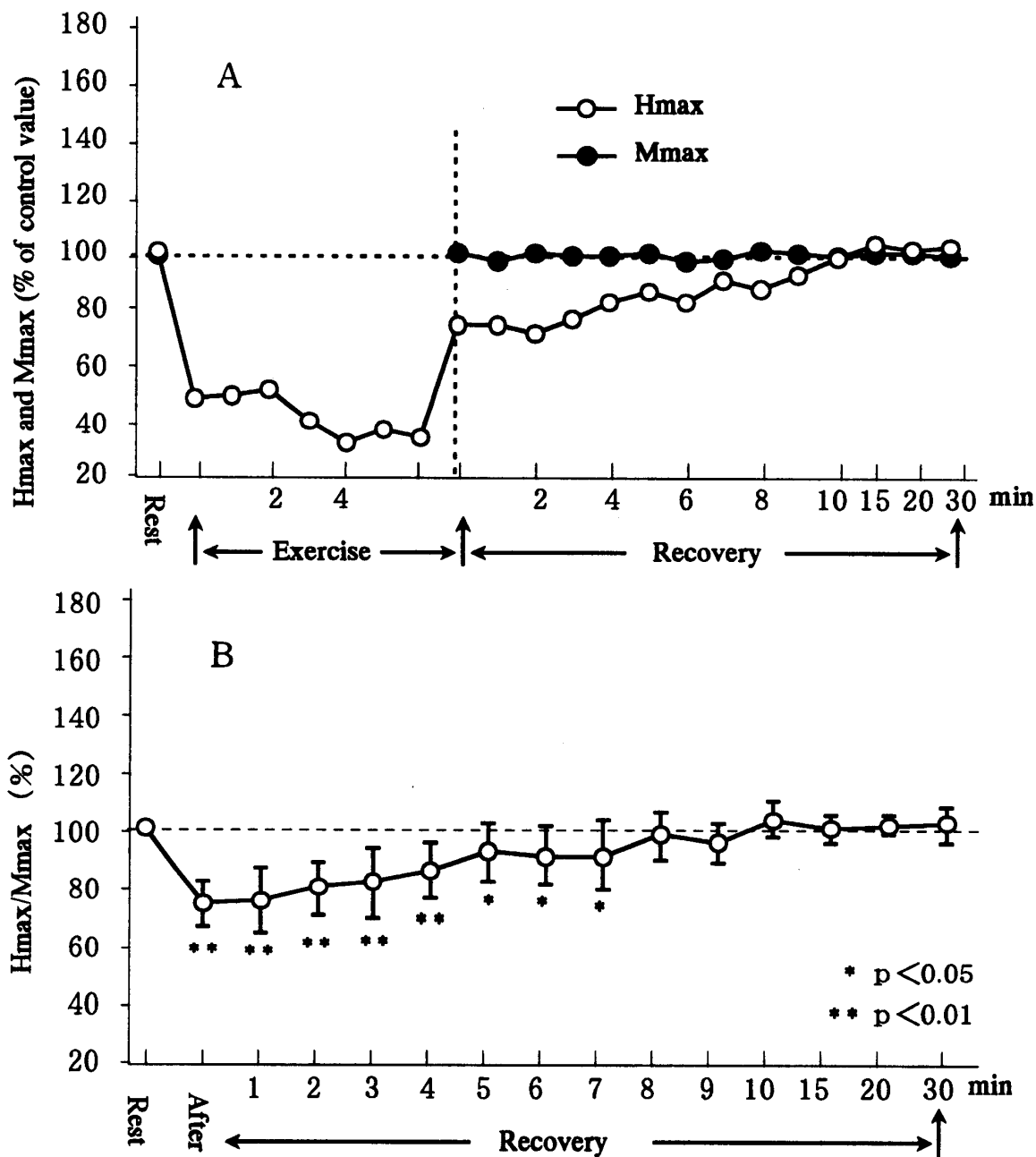
Fig. 4 には、底屈および背屈運動課題終了後におけるヒラメ筋 Hthr と Mthr をそれぞれ安静時の値を 100%として相対値で示した。底屈運動課題では、主動筋であるヒラメ筋の Hthr の値は、安静時と比較して有意差は見られなかったが、背屈課題では、拮抗筋

であるヒラメ筋の Hthr の値は安静時と比較して  $123.16 \pm 15.35\%$  と有意に増加した ( $p < 0.01$ )。また、Mthr はいずれにおいても有意に変化しなかった。

**考 察**

**1. 底屈運動課題について**

本運動課題遂行中、筋疲労とともに筋電図積分値が



**Fig. 3.** Change of H wave amplitude of the muscle fatigue before and after where the soleus muscle becomes an antagonist.

One example of the typical subject Hmax and Mmax in Fig. 3-A.

Mean and standard deviations of the Hmax/Mmax of ten subjects in Fig. 3-B.

有意に増加したことは、50% MVC の筋張力を維持するために、運動単位の動員やインパルス発射頻度が増大したためと考えられる<sup>3,9)</sup>。しかし、運動中に増大されていた H 波振幅値は、後半から低下してくる傾向が認められた。この結果は、 $\alpha$  運動ニューロンの内在性順応現象に加えて、次の二つの機序が考えられる。すなわち、①脊髄運動ニューロンへの Ib 抑制の亢進、②錘内筋疲労に伴う  $\gamma$  回路を介する  $\alpha$ - $\gamma$  連結の活動

性の低下によって引き起こされた  $\alpha$  運動ニューロンへの促通の低下である。

本研究では足関節底屈運動時に足関節底屈の最大筋力の50% (50% MVC) という運動課題を疲労困憊に至るまで持続させた。運動初期には50% MVC に相当する筋収縮運動であったと考えられるが、運動継続時間の経過に伴い疲労が進行することにより50% MVC に相当する筋力を発揮しているにも関わらず、運動終了

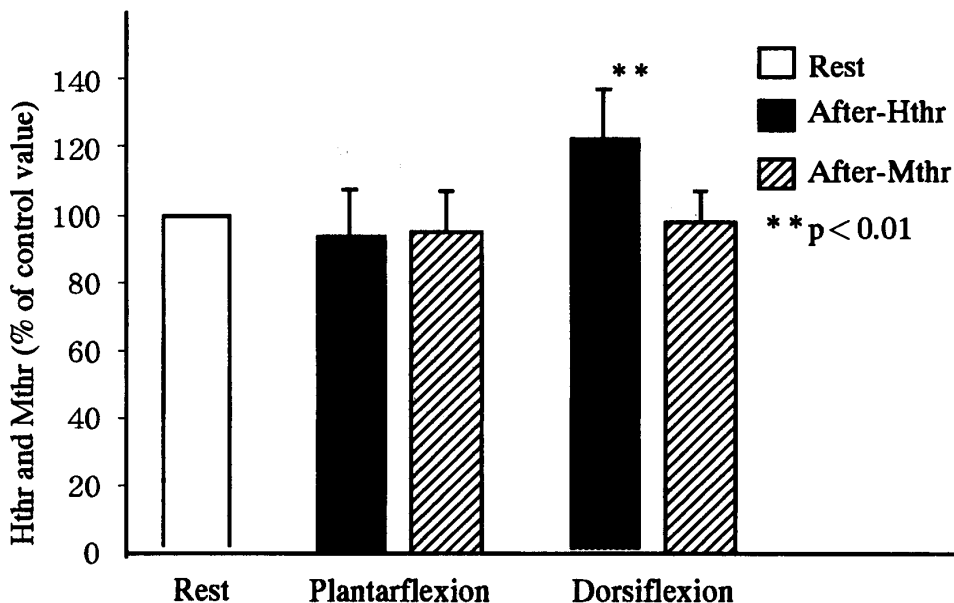


Fig. 4. Comparison of Hthr and Mthr means by before and after exercise in plantarflexion and dorsiflexion.

直前の筋放電量（筋電図積分値）が有意な増加を示したことから筋は最大収縮をしていたものと考えられる。等尺性筋収縮を徐々に強くすると、Ib 群線維の発火頻度がステップ状に増加し、最大筋収縮を行うと Ib 群信号が高頻度放電すると報告されており<sup>10)</sup>、本研究で用いた運動課題中にも Ib 抑制の亢進が起こったものと推察できる。また、強い筋収縮に伴う筋疲労時には錘外筋のみならず、錘内筋も同時に疲労するとの報告があり<sup>23,24)</sup>、この報告からも錘内筋の疲労が  $\gamma$  回路を介して  $\alpha$ - $\gamma$  連結の活動性を低下させ、 $\alpha$  運動ニューロンが促進されなくなったと考えることできる。これら 2 つの脊髄反射機構により H 波の振幅が低下したものと考えられる。

一方、M 波は  $\alpha$  運動線維の興奮により生じる複合筋活動電位であり、その変化は H 波の大きさに影響を与えるため、H 波振幅の M 波振幅に対する比率は、脊髄  $\alpha$  運動ニューロン活動性の変化を直接かつ正確に反映すると考えられる<sup>12)</sup>。一般に、Mmax をその運動プール内すべての  $\alpha$  運動ニューロンが興奮した場合の筋放電量と考えられると、Hmax/Mmax は全運動プールに対する興奮された  $\alpha$  運動ニューロンの割合を示す<sup>21)</sup>。本研究の結果から、Hmax/Mmax は運動終了 30 分後でも  $74.90 \pm 10.89\%$  と低下していた。これは底屈課題終了後に最大努力で随意筋収縮を行ったことによる影響が、筋収縮停止後直ちに消失するのではなく、運動終了後の回復期にも脊髄運動ニューロン群に対する影響として残存したものと考えられる。筋が運動により疲労すると、血液または筋内に蓄積された  $H^+$  や

$K^+$  等の化学物質が III・IV 群神経終末に化学的刺激を与え、III、IV 群神経線維からの感覚入力信号は脊髄もしくは脊髄上位中枢内の複数個の介在ニューロンを介して、脊髄  $\alpha$  運動ニューロンの活動性を抑制すると報告されている<sup>1,2,13,25)</sup>。本研究でも、運動中に筋疲労により筋内代謝産物が産生され、運動終了後でもこれらは直ちに消失せず、残された代謝物質が III・IV 群感覚終末を持続的に刺激して、Hmax/Mmax が運動終了 30 分後でも回復しなかったものと考えられる。

また、Kernell ら<sup>18,19)</sup> は、細胞内電極による通電実験で、末梢筋に持続的電気刺激を与えると、筋力低下に伴い運動細胞の膜電位は高くなり、活動電位は自発的に減弱すると報告している。本研究でも 50% MVC の筋力を発揮し続けるという随意的な運動課題の遂行によって、興奮性入力が持続的に運動ニューロンに加えられて膜電位に変化が生じ、その結果として運動終了後も Hmax/Mmax が低下していたとも考えられる。

Hthr は Hmax と同様に、脊髄  $\alpha$  運動ニューロン興奮性を評価する指標として応用できると考えられている<sup>11,27)</sup>。しかし、本研究の足関節底屈運動課題では、筋疲労後に Hthr は有意な変化が認められなかった。主動筋疲労時の Hthr の変化には、Hmax/Mmax に与える変化とは異なった神経生理学的機序が反映されていると思われる、今後さらに詳細な検討を加える必要がある。

## 2. 背屈運動課題について

本研究では、50% MVC 足関節等尺性背屈運動を用

いて、前脛骨筋を疲労させた時の拮抗筋としてのヒラメ筋H波およびM波の変化を観察した。その結果、背屈運動開始直後から、ヒラメ筋Hmaxは強く抑制され、運動時間の経過に伴ってヒラメ筋Hmaxへの抑制量も漸増した。これは主動筋である前脛骨筋のIa群線維を介した相反抑制によるものと考えられる。しかし、筋疲労により背屈課題を終了した後、低下したヒラメ筋Hmaxは安静時のレベルにまで回復せず、Hthrの値は安静時よりも有意に増加した。このような主動筋からの拮抗筋への脊髄反射機構の抑制を生じさせたメカニズムは、現時点ではまだ不明であるが、収縮を行った主動筋からのⅢ・Ⅳ群感覚入力の影響が関与する可能性も推測できる。このⅢ・Ⅳ群感覚入力信号は主動筋側の脊髄内Ia介在ニューロンを介して拮抗筋の脊髄 $\alpha$ 運動ニューロンの抑制を起こす<sup>8,15)</sup>。また、このⅢ・Ⅳ群感覚入力信号は多数の脊髄内上行経路で辺縁系、視床、大脳皮質等広い部位に投射している。後者は、皮質脊髄路<sup>6)</sup>、赤核脊髄路および前庭脊髄路<sup>16)</sup>等の下行路を経て、主動筋側のIa介在ニューロンを促通し、拮抗筋の脊髄 $\alpha$ 運動ニューロンを抑制する。これらの一連の研究からも本研究で示された主動筋の筋疲労による拮抗筋H波の低下現象は、機械・代謝的刺激に応じる主動筋のⅢ・Ⅳ群からの感覚入力信号が上述の経路を介して、Ia抑制性介在ニューロンを促通して、拮抗筋脊髄 $\alpha$ 運動ニューロンが抑制された結果として生じたものと推察できる。今後、Ⅲ・Ⅳ群感覚入力の影響についてさらに検討を加える必要がある。

### 参 考 文 献

1. **Avela, J., Kyrolainen, H. and Komi, P.V.** 1999. Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *J. Appl. Physiol.* **86** : 1283-1291.
2. **Bakels, R. and Kernell, D.** 1994. Threshold-spacing in motoneurone pools of rat and cat: possible relevance for manner of force gradation. *Exp. Brain Res.* **102** : 69-74.
3. **Belanger, A. Y.** 1981. Extent of motor unit activation during effort. *J. Appl. Physiol.* **51** : 1131-1135.
4. **Bigland-Ritchie, B. R., Dawson, N. J., Johansson, R. S. and Lippold, O. C.** 1986. Reflex origin for the slowing of motoneurone firing rates in fatigue of human voluntary contractions. *J. Physiol.* **379** : 451-459.
5. **Bongiovanni, L. G., Stjernberg, L. and Hagbarth, K. E.** 1990. Prolonged muscle vibration reducing motor out-put in maximal voluntary contractions in man. *J. Physiol.* **423** : 15-26.
6. **Cheney, P., Fetz, E. E. and Palmer, S. S.** 1985. Patterns of facilitation and suppression of antagonist forelimb muscles from motor cortex sites in the awake monkey. *J. Neurophysiol.* **53** : 805-820.
7. **Cresswell, A. G. and Loscher, W. N.** 2000. Significance of peripheral afferent input to the alpha-motoneurone pool for enhancement of tremor during an isometric fatiguing contraction. *Eur. J. Appl. Physiol.* **82** : 129-136.
8. **Delwaide, P. J. and Pepin, J. L.** 1991. The influence of contralateral primary afferents on Ia inhibitory interneurons in humans. *J. Physiol.* **439** : 161-179.
9. **Duchateau, J. L. and Hainaut, K.** 1984. Training effects on muscle fatigue in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* **53** : 248-252.
10. **Edin, B. B. and Vallbo, A. B.** 1990. Dynamic response of human muscle spindle afferents to stretch. *J. Neurophysiol.* **63** : 1297-1306.
11. **Ferris, D. P., Aagaard, P., Simonsen, E. B., Farley, C. T. and Dyhre-Poulsen, P.** 2001. Soleus H-reflex gain in humans walking and running under simulated reduced gravity. *J. Physiol.* **530** : 167-180.
12. **Fukushima, Y. and Yamashita, N.** 1982. Facilitation of H-reflex by homonymous Ia afferent fibers in man. *J. Neurophysiol.* **48** : 1079-1088.
13. **Garland, S. J.** 1991. Role of diameter afferents in reflex inhibition during human muscle fatigue. *J. Physiol.* **429** : 47-58.
14. **Hayward, L., Breitbart, D. and Rymer, W. Z.** 1988. Increased inhibitory effects on close synergists during muscle fatigue in the decerebrate cat. *Brain Res.* **440** : 199-203.
15. 本郷利憲, 他 1989. 標準生理学 p.274. 医学書院.
16. **Hultborn, H. and Santini, M.** 1976. Convergence on interneurons mediating the reciprocal Ia inhibition of motoneurons. III. Effects from supraspinal pathways. *Acta Physiol. Scand.* **96** : 368-391.
17. 猪飼道夫, 山川純子 1953. 反復動作に於ける動作の乱れの筋電図学の研究. *体育学研究* **5** : 340-344.
18. **Kernell, D. and Monster, A. W.** 1982. Motoneurone properties and motor fatigue. *Exp. Brain Res.* **46** : 197-204.
19. **Kernell, D. and Hultborn, H.** 1990. Synaptic effects on recruitment gain: a mechanism of importance for the input-output relations of motoneurone pools? *Brain Res.* **507** : 176-179.
20. 小宮山伴与志, 笠井達哉 1988. 筋収縮力の違いが主動筋促通及び拮抗筋抑制に与える影響. *体育研究* **33** : 135-144.
21. **Kuon, M.** 1959. Excitability following antidromic

- activation in spinal motoneurons supplying red muscles. *J. Physiol.* **149** : 374-393.
22. **Kukulka, C. G., Moore, M. A. and Russell, A. G.** 1986. Changes in human alpha-motoneuron excitability during sustained maximum isometric contractions. *Neurosci. Lett.* **68** : 327-333.
23. **Ljubisavljevic, M. and Anastasijevic, R.** 1994. Fusimotor-induced changes in muscle spindle outflow and responsiveness in muscle fatigue in decerebrate cats. *Neuroscience* **63** : 339-348.
24. **Macefield, G., Hagbarth, K. E., Gorman, R., Gandevia, S. C. and Burke, D.** 1991. Decline in spindle support to alpha-motoneurons during sustained voluntary contractions. *J. Physiol.* **440** : 497-512.
25. **Pettorossi, V. E., Della-Torre, G., Bortolami, R. and Brunetti, O.** 1999. The role of capsaicin sensitive muscle afferents in fatigue-induced modulation of the monosynaptic reflex in the rat. *J. Physiol.* **515** : 599-607.
26. **Sandercock, T. G. and Faulkner, J. A.** 1985. Single motor unit and fiber action potentials during fatigue. *J. Appl. Physiol.* **58** : 1073-1079.
27. 田中勳作 1986. H 反射-ヒトにおける神経生理が研究の一技法. *日本生理誌* **48** : 719-734.
28. **Taylor, J. L., Butler, L. E., Allen, G. M. and Gandevia, S. C.** 1996. Changes in motor cortical excitability during human muscle fatigue. *J. Physiol.* **490** : 519-528.

## Changes of Agonist and Antagonist Spinal Motor Neurons Excitability by Muscle Fatigue: analysis of H-reflex and M waves of evoked electromyogram

WANG Guoxiang<sup>1)</sup>, Kiyoshi ONARI<sup>2)</sup>, Kotaro KAWAGUCHI<sup>2)</sup>  
Fuminari KANEKO<sup>3)</sup> and ZHAO Jinhua<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Medicine, Hiroshima University

<sup>2)</sup>Institute of Health Sciences, Hiroshima University School of Medicine

<sup>3)</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

This study examined the chronological changes of H-reflex and M waves in soleus muscle before and after fatigue induced by isometric ankle joint plantar/dorsal flexion to clarify the changes of agonist/antagonist spinal motor neurons excitability involved in muscle fatigue. Subjects were 10 healthy males who performed ankle joint isometric exercise at 50% maximum voluntary contraction (MVC). Results were: (1) After plantar flexion caused soleus muscle fatigue, the soleus muscle Hmax/Mmax (amplitude ratio between maximum H-reflex and M waves) stayed at a low value for a long time. (2) After dorsal flexion caused tibialis anterior muscle fatigue, the soleus muscle (antagonist) Hmax/Mmax fell to  $70.13 \pm 8.85\%$  of the resting value and then gradually recovered. (3) After the tibialis anterior muscle fatigue, the soleus muscle (antagonist) Hthr (H-reflex threshold) significantly increased as compared with the resting value. Results (2) and (3) showed that the agonist's fatigue inhibits not only the agonist but also non-exercised antagonist spinal motor neurons.