

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：32671

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500684

研究課題名(和文) 最大下随意筋力調節における運動単位頻度変調の特性

研究課題名(英文) Modulation of motor unit discharge rate during submaximal contractions

研究代表者

加茂 美冬 (Kamo, Mifuyu)

日本女子体育大学・体育学部・教授

研究者番号：30224702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： 運動ニューロンの放電特性を理解するため、運動単位の放電の多様性を検討した。(1)一定筋力発揮時の放電様式は筋力増大期放電履歴に伴い変化した、(2)単一運動単位の放電頻度一定調節時、初期に他の運動単位の頻度は必ずしも一定ではなく、また一定頻度調節は活動参加が生じても可能であった。これらの結果から、多様性は活動初期および筋疲労期において運動ニューロンの固有特性を基に生じやすい特性をもつことが示唆された。

研究成果の概要(英文)： The purpose of this study was to examine heterogeneous discharge pattern of motor units during submaximal contractions. In ramp-and-hold contractions, the discharge patterns of motor unit during the hold phase changed depending on discharge history during the ramp phase. When the subject was asked to recruit a discernible single motor unit and maintain its firing at a constant rate, the firing rates of some non-targeted motor units changed during the initial phase of the contraction, and the magnitude of surface EMG increased while the targeted motor unit maintained a constant rate. These results suggest that motor units during the initial and fatigue phase readily produce a variety of discharge pattern based on the difference of balance of synaptic input to motoneuron pool and intrinsic properties of each motoneuron.

研究分野：運動生理学

キーワード：運動単位 放電頻度 多様性

## 1. 研究開始当初の背景

動物であるヒトにとって、筋力発揮は、生命、健康維持だけでなく、スポーツといった文化的活動をも生み出すことから、生きるためのみならずよりよく生きるためにも重要な生理的機能である。本研究は、神経系による筋力発揮の調節機構を理解するために、筋線維群に最終的に指令を送る脊髄 $\alpha$ 運動ニューロン( $\alpha$ MN)の放電特性を明らかにしようとするものである。

これまで、ヒト筋力調節における $\alpha$ MNの放電様式は、運動単位(MU)レベルで、主に等尺性の筋力増大・低下(ランプ)あるいは一定筋力発揮(ランプ&ホールド)課題において調べられてきた。1970年代にランプ&ホールド課題におけるホールド期では筋力が一定に保たれているにも関わらず、多くのMUの放電頻度は時間とともに低下することが報告され(Person and Kudina 1972),それ以後、多くの研究者によっても確認された。しかし、低下以外に、頻度増加あるいは一定を保つMUも存在すると報告され、一定筋力は $\alpha$ MN毎に異なる多様な放電様式により調節されていると考えられるようになった。しかし、その多様性の合目的性や発現メカニズムについては明らかではない。

## 2. 研究の目的

ヒト随意筋力調節における $\alpha$ MNの放電特性のうち、一定筋力調節時に観察されるMU放電様式の多様性をもたらす仕組みを明らかにするために、以下の2点について検討した。1) ランプ&ホールド課題のランプ期における放電履歴がホールド期の放電様式に及ぼす影響、2) 単一MUの出力(放電頻度)コントロール課題時の他のMU活動。

## 3. 研究の方法

(1) ランプ期における放電履歴がホールド期の放電様式に及ぼす影響

観察対象とするMUを決定し、ランプ&ホールド課題におけるホールド期の目標筋力(TF)を決定した。その後、TFを90秒間調節する課題を異なる3つの筋力増大勾配(RR)条件で行わせた。RRは最大筋力(MVC)の2%/s, 10%/sおよび20%/sであった。観察対象MUの活動参加閾値張力(RT)および放電頻度(FR)を計測した。実験は、足関節底屈(実験)および膝関節伸展(実験)において行った。【実験】被験者は11名であった。筋力調節課題は、膝関節角度60度および足関節角度90度の条件で行った。MU活動電位は内側腓腹筋から筋内埋入電極により導出した。【実験】被験者9名であった。筋力調節課題は、股関節角度90度および膝関節角度90度の条件で行った。MU活動電位は内側広筋あるいは外側広筋から表面電極法(e.g. Morimoto et al. 1980)により導出した。

(2) 単一MUの出力(放電頻度)コントロール課題時の他のMU活動

被験者は9名であった。(1)の実験と同様に膝関節伸展において内側広筋および外側広筋から単一MUの活動電位を表面電極法にて導出した。一つのMUのFRをリアルタイムにPCディスプレイに表示することで被験者に視覚的にフィードバックし、FRを一定に調節させた。このとき、他のMUの活動をFRおよび表面筋電位から観察した。

## 4. 研究成果

(1) ランプ期における放電履歴がホールド期の放電様式に及ぼす影響

目標筋力は15-72%MVCの範囲にあった。RR条件によりホールド期開始時点のFR(FR-H)は変化した。この結果から、RR条件毎に異なるMU放電履歴はホールド期開始時点までに調節され解消されるわけではなく、神経系は異なる $\alpha$ MNあるいは $\alpha$ MNプールの状態からホールド期の筋力調節を

開始することが確認された。

ホールド期開始時からの FR 変化には、低下と増大 (I) の 2 つのパターンが観察された。低下パターンはこれまでに多く研究者により報告されているが、I パターンの報告はわずかしかない (Maton 1981)。しかし本研究では、I パターンは全ての RR 条件で観察され、観察した MU のうちの約 30% と高い割合で観察された。この増大は面白いことに同じ MU が異なる RR 条件で低下パターンを示したときの FR と収束するまで続くものであった。収束は 30 秒以内に生じた。D パターンには 2 つのタイプが観られた。一つは、FR は低下するが放電休止には至らないタイプ (D) と放電休止まで FR 低下が低下しその後再放電するタイプ (De-Re) である。I と De-Re を示すときの FR-H は D パターンと比較して有意に低かった (図 1)。

これらの結果から、ランプ&ホールド課題においてランプ期の放電履歴はホールド期の放電様式を変化させることがわかった。したがって、ランプ期の放電履歴はホールド期の放電の多様性を生む一つの要因であることが明らかになった。また、その影響は 30 秒以内に調整され、その後は同じ放電頻度変化を示す特徴をもつこともわかった。ランプ&ホールド筋力調節課題における MU 活動については数多くの研究者により観察されてきたが、それらの多くは観察する MU の活動参加閾値張力と目標筋力の差が大きい条件での観察であったため (e.g. De Luca et al. 1996), Hold 期開始時に興奮性の低い状態の MU が観察対象になることが少なかった。そのため、I および De-Re パターンが観察され難かったと考えられる。I および De-Re パターンの発現メカニズムは現時点では明らかではないが、これまでの動物実験の報告から考えると  $\alpha$ MN の固有の特性に基づくと考えられる (Heckman and Enoka 2012)。

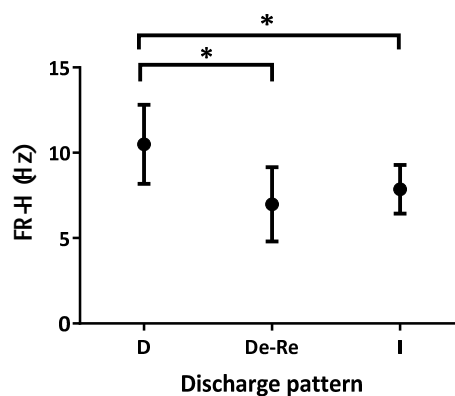


図 1 運動単位放電様式とホールド期開始時の放電頻度 (FR-H) の関係

\* $p < 0.05$

## (2) 単一 MU の出力 (放電頻度) コントロール課題時の他の MU 活動

観察対象とした MU の活動参加閾値張力は 10% MVC 以下であった。一定頻度調節の目標頻度を 10 Hz 以上に設定したとき、30s 以上調節することが困難であった。安定した調節が可能であったのは目標頻度が 7~8 Hz であり 5 分以上維持できた。第一背側骨間筋 (FDI) の MU では 10 Hz で安定した調節ができることが報告されている (Johnson et al. 2004) ことから、 $\alpha$ MN の特性は筋毎に異なると考えられる。

一定頻度調節初期 30~90 秒間では、他の MU の放電頻度が一定でない場合が観察された (図 2)。この結果は、必ずしもこれまでの報告と一致していなかった。Johnson et al. (2004) は FDI の MU では一定頻度調節中、他の MU の頻度も一定に保持されることを報告している。ただ、彼らの実験では MU の頻度が一定に達するまでに 22 秒要したとしていることから、実験条件の差による可能性もある。また、Nordstrom et al. (1991) は咬筋では他の MU は一定頻度を示さないことがあると報告しているが、頻度調節の初期に一定でないケースについては報告していない。したがって、今後、プロトコルや被験筋の違いなどについて検討する必要があるものの、本研究の結果は、MU 活動の初期に

放電の多様性が発現しやすいことを示していると考えられる。

一定頻度調節 4 分以降では、表面筋電位の増大が観察された。この結果は、FDI での Jonson et al. (2004) と一致した。したがって、筋の違いに関わらず、FR を一定に保ち続けるには時間とともに興奮入力量を増大させなければならないことがわかった。また、 $\alpha$ MN の FR は必ずしも  $\alpha$ MN プール全体の興奮性を反映しないというこの結果は、筋力発揮初期だけでなく筋疲労が発現する時期の FR の決定にも  $\alpha$ MN 固有の特性が影響することを示唆する。

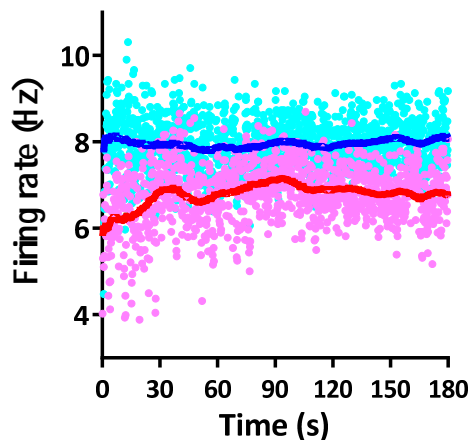


図 2 単一運動単位の一一定頻度調節中の非ターゲット運動単位の放電頻度変化

一定頻度調節中の単一運動単位の放電頻度（水色丸，そのスムージングは青線）は 180 秒間約 8Hz に保持されているが，非ターゲットの放電頻度は（ピンク丸，そのスムージングは赤線）は初期増大し続けている。

### (3) まとめ

実験(1)および(2)で得られた結果から、ランブ&ホールド筋力調節課題に見られるMU放電様式の多様性は、MU活動初期および筋疲労発現時期において個々の $\alpha$ MNの固有の特性に基づき生ずる可能性が示唆された。今後は、今回得られた結果を元にさらに多様性の発現メカニズムについて探るとともに、合目的性について検討を加え、筋力発揮の最終共通路である $\alpha$ MNの特性について理解を深めたい。

### <引用文献>

Person RS, and Kudina LP. Discharge frequency and discharge pattern of human motor units during voluntary contraction of muscle.

Electroencephalogr Clin Neurophysiol 32: 471-483, 1972.

Morimoto S, Umazume Y, and Masuda M. Properties of spike potentials detected by a surface electrode in intact human muscle. JPN J Physiol 30: 71-80, 1980.

Maton B. Human motor unit activity during the onset of muscle fatigue in submaximal isometric isotonic contraction. Eur J Appl Physiol 46:271-281, 1981.

De Luca CJ, Foley PJ, and Erim Z. Motor unit control properties in constant-force isometric contractions. J Neurophysiol, 76: 1503 – 1516, 1996.

Heckman CJ, and Enoka RM. Motor unit. Compr Physiol 2: 2629-2682, 2012.

Johnson KVB, Edwards SC, Van Tongeren C, and Bawa P. Properties of human motor units after prolonged activity at a constant firing rate. Exp Brain Res 154: 479-487, 2004.

Nordstrom MA and Miles TS. Instability of motor unit firing rates during prolonged isometric contractions in human masseter. Brain Res 549:268-274, 1991.

### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Morimoto S and Takemori S. Wave form of motor unit action potential recorded by surface electrode during voluntary muscle contraction. J Phys

Fitness Sports Med, 査読有, Vol 3, 2014, 191-198.

DOI: 10.7600/jpfsm.3.191

森本茂, 加茂美冬 低水準での持続的筋力発揮時の運動単位活動参加と全筋および運動単位筋振動(筋音)信号. 体力科学, 査読有, 62巻, 2013, 159-169.

DOI: 10.7600/jspfsm.62.159

[学会発表](計6件)

森本茂 持続的筋力発揮時の全筋筋音および運動単位振動信号変化動態の筋部位差. 第69回日本体力医学会 2014年9月20日, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市文教町)

野崎理紗, 町田修一, 加茂美冬 最大随意収縮後の Postactivation Potentiation が最大下筋力発揮に及ぼす影響. 第69回日本体力医学会 2014年9月20日, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市文教町)

森本茂 導出方法の差異による運動単位活動電位波形に内在する情報の違い. 第22回日本運動生理学会, 2014年7月19日, 川崎医療福祉大学(岡山県倉敷市)

Kamo M, Bellett MJ and Cresswell AG Motor unit discharge behavior during voluntary ramp-and-hold contractions with different rates of excitatory input. Society for Neuroscience 43<sup>rd</sup> Annual meeting 2013, 2013年11月13日, San Diego, USA

加茂美冬 Ramp-and-hold contractionの ramp phaseにおける運動単位放電頻度変化. 第68回日本体力医学会, 2013年9月23日 日本教育会館(東京)

森本茂, 加茂美冬 持続的筋力発揮時の単一運動単位活動電位—筋振動信号(筋音)間の発現遅延時間. 第67回日本体力医学会大会, 2012年9月14日, 長良川国際会議場(岐阜県)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

加茂 美冬 (Kamo Mifuyu)

日本女子体育大学体育学部・教授

研究者番号: 30224702

### (2)連携研究者

森本 茂 (Morimoto Shigeru)

横浜国立大学教育人間科学部・教授

研究者番号: 70119858

### (3)研究協力者

Cresswell AG

School of human movement studies. The University of Queensland・Professor

Bellett MJ

School of human movement studies. The University of Queensland