

平成 22 年 6 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008 ～ 2009
 課題番号：20700476
 研究課題名 (和文) 電気刺激筋収縮における最適な力発揮を誘発する刺激パターンとそのメカニズムの解明

研究課題名 (英文) Mechanisms of force enhancement during electrically-induced contractions at a constant stimulation frequency by an additional pulse in humans.

研究代表者
 吉武 康栄 (YOSHITAKE YASUHIDE)
 鹿屋体育大学・体育学部・講師
 研究者番号：70318822

研究成果の概要 (和文)：

一定頻度の電気刺激による骨格筋収縮中に、単発の刺激を付加すると、発揮張力は増大し、かつそのまま維持される現象 (catchlike property) が認められる。本研究では、catchlike property について、(1) 力の増大が最も起こりやすい至適な一定頻度の電気刺激周波数の同定、(2) 張力の増大と超音波 B モード法による筋・腱複合体の振る舞いとの関係性からの catchlike property の発生機序を検討することを目的とした。一連の実験結果より、catchlike property は、至適な電気刺激周波数が存在し、その値は下腿三頭筋の場合はおおよそ 17.5Hz である、また、発生メカニズムは筋・腱複合体のスティフネスの増加が関与していることが示唆された。

研究成果の概要 (英文)：

Muscle force is enhanced when an extra pulse is applied during an electrically evoked muscle contraction with a constant stimulation frequency ("catchlike property"). To elucidate these mechanisms, we measured the behaviors of muscle-tendon complex using ultrasound B-mode. From the results of current study, the enhancement in force induced by an extra pulse is due to an increase in muscle stiffness in humans.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：体育学，バイオメカニクス，応用生理学

科研費の分科・細目：身体教育学・教育生理学

キーワード：筋・腱複合体，超音波 B モード法，catch-like property，電気刺激

1. 研究開始当初の背景

機能的電気刺激法 (FES 法) は、筋萎縮の進行が著しい超高齢者・筋萎縮症患者、さらに

随意的に筋収縮を行い四肢の動きを発現させることが困難である脊髄損傷患者・脳卒中患者などに対して、電気刺激を筋や運動神経

に与えることによって補償的に筋収縮を誘発し、運動動作（立位、歩行など）を再建する方法のことであり、国際的にも活用されている。

電気刺激によって発揮される力の大きさは刺激頻度の高さに依存するため（Burke 1999）、高レベルで力発揮を確保しなければならない場合は、高い刺激頻度が必要とされる。しかしながら、高頻度刺激による高頻度筋収縮は必然的に早期の筋疲労を招く。つまり、FES 法は、筋疲労、力発揮レベル、刺激頻度という相反する因子によって成り立っているため、実益的ではないことが多い。よって、FES 法を臨床分野で適切に活用するためには、何らかの方法により「筋疲労を避けるために刺激頻度は低いまま、なおかつ発揮する力を大きくする」という一見矛盾する生理学的状況を獲得しなければならない。

ここで、興味深いことに、一定頻度での電気刺激時に単発（たった一つ）の刺激を付加するだけで、発揮した力が増大され、かつ維持される現象が古くに報告されている。この現象は学術的に catchlike property（単発刺激後張力増大現象）と呼ばれている。ここで注目すべきは、単発刺激を付加する前後において刺激頻度は同一であるにもかかわらず、単発刺激付加後は顕著に力が増大してそのまま維持されているということである。つまり、この単発刺激後張力増大現象が発現するような刺激パターンを用いれば、筋疲労が発生しにくい低い刺激頻度にもかかわらず、単発刺激を付加するだけで高い目標レベルまでの力発揮を可能とする、ということである。申請者はこの現象を応用すれば FES 法でも問題となっている筋疲労が軽減可能であると着目するに至った。

2. 研究の目的

(1) 単発付加後張力増大現象（catchlike property）が効率よく発生するための一定頻度刺激を定量化する。

(2) 超音波 B モード測定によって単発付加後張力増大現象発生時の筋・腱の形状変化を明らかにし、生理学的発生メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 被検者は成人健常者 8 名とした。実験は、単発の刺激を加えた時、どの一定の刺激周波数での刺激時が最も効果的に力が增加するかをまず明らかにするために、数種類の一定頻度刺激（2.5～20Hz、2 秒間：CONT）と、CONT に刺激開始後 1 秒後に単発刺激を加えた CATCH 条件の刺激を行った。同一の刺激周波数における CONT と CATCH との力の差分（単発刺激による力の増加・維持量）を算出し、

単発刺激後張力増大現象を誘発する至適な一定刺激周波数を同定した。

(2) 被検者は成人健常者 10 名とした。前年度の実験で各対象筋での同定した至適刺激周波数を基準にし、CATCH（単発刺激後張力増大現象を利用した刺激）の刺激を行い、神経刺激による対象筋（下腿三頭筋）の筋収縮を誘発し力を発揮させた。その際、超音波診断装置を用いて腓腹筋内側頭の縦断画像を 30Hz にて連続的に撮影した。得られた画像から、筋束と深部腱膜の交点の移動距離を腱組織の伸張量として計測した。

4. 研究成果

(1) catchlike property を引き起こす至適刺激周波数の定量化

図 1 は、各一定頻度刺激による電気刺激誘発筋収縮中において、刺激開始後 1 秒後に単発刺激を加えた（CATCH）際の発揮トルクの例

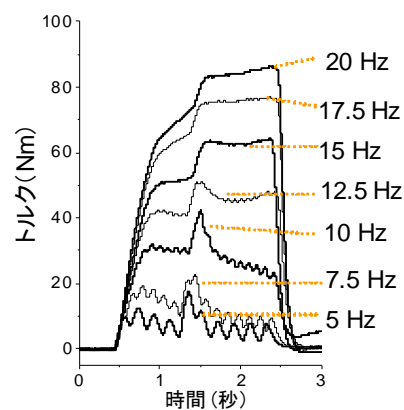


図 1. 各ベース刺激周波数での CATCH 刺激におけるトルク信号の例

である。この図より、12.5Hz～17.5Hz に張力増大の維持（catchlike property）が発生していることがわかる。

図 2 は、2 秒間の電気刺激において、刺激開始 1 秒後における単発刺激付加前後のトルクの変化率を示している。なお、一定頻度刺激（CONT）においても、CATCH と同一区間のトルクの変化率を算出している。2 元配置の分散分析（刺激条件×刺激頻度）により、15、17.5、20Hz での電気刺激時に、単発刺激付加によるトルクの増加（catchlike property）が発生していることが明らかとなった。また、17.5Hz が、一番単発刺激付加によるトルクの増加率が一番高いことがわかる。一方、これらの刺激頻度より低い刺激周波数（5Hz～12.5Hz）での刺激時には、単発刺激付加を行

ったとしても、一時的なトルクの増大が見られるものの(図1参照),維持されない。本研究の結果から, catchlike property には, その background となる一定頻度刺激の刺激周波数に至適周波数が存在し, その値は 17.5Hz であることが明らかとなった。

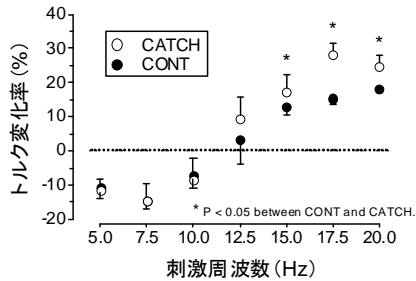


図2. 一定頻度刺激 (CONT) およびCONTに単発刺激付加した条件下における発揮トルクの増加率

(2) catchlike property 発生中における超音波 B モード法による筋・腱複合体の振る舞いの定量化

図3は, 超音波 B モード法による筋・腱複合体の振る舞いを定量化する過程の概要図である。本研究では, 筋束と深部腱膜の交点の筋収縮による移動距離を腱の伸張量として算出した。

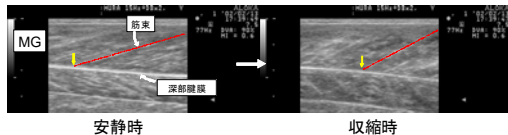


図3. 超音波Bモード法による下腿三頭筋の縦断面像の例。腓腹筋内側頭(MG)において, 筋束(赤線)とアキレス腱の深部腱膜(白線)との交点(黄色矢印)が, 安静時(写真左)に比べて, 収縮時(右側)では筋束が短縮し, 腱が伸張され交点が移動しているのがわかる。この移動距離を算出し, 腱の伸張量とした。

図4は, 17.5Hz での電気刺激中において, 単発刺激付加を行った場合のトルクおよび腱の伸張量の時間変化を示している。腱の伸張量は, 単発刺激付加によって増大され, また, 力の増大が維持している場合は, その余剰伸張分もそのまま保たれる様相を呈した ($P < 0.05$)。

等尺性筋収縮の場合, 腱が伸張することは筋長が短縮することを意味する。つまり, 筋長-張力関係を考慮した場合, 単発刺激付加後に短縮された筋は効率良く張力を発揮できる長さに位置してことが張力の増大・維持に大きく貢献しているといえる。また, 筋の短縮・腱の伸張が保たれている生理学的条件は, 筋・腱複合体のスティフネス (stiffness) の増大を意味していることから, catchlike

property は, 筋・腱複合体のスティフネスの増大が大きな貢献因子であると考えられる。

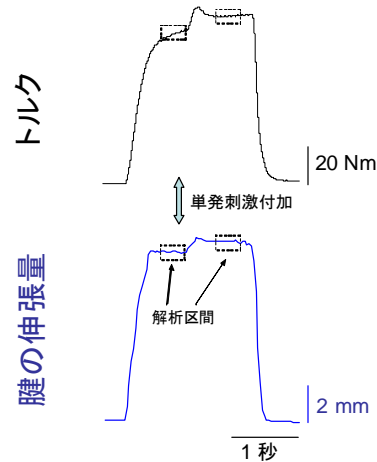


図4. 17.5Hzでの一定頻度刺激中に, 単発刺激を付加した際のトルク(上段)および超音波Bモードより定量化された腱の伸張量(下段)の例

以上の結果より,

- (1) catchlike property は, 至適な刺激周波数があり, それは 17.5Hz である。
- (2) catchlike property 発生時には, 腱が余剰に伸張された筋形状になり, それが保たれている。よって, catchlike property の発生メカニズムは, 筋・腱複合体のスティフネスの増大が大きな成因因子である。

ことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Katayama K, Yoshitake Y, Watanabe K, Akima H, Ishida K. Muscle deoxygenation during sustained and intermittent isometric exercise in hypoxia. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2010. 印刷中。
- ② 吉武康栄, 篠原 稔. 筋音図の発生機序と運動制御分野での応用性について. システム制御情報学会誌. 2010. 印刷中

- ③ Shinohara M, Yoshitake Y, Kouzaki M ; Alterations in synergistic muscle activation impact fluctuations in net force. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 41(1):191-197. 2009.
- ④ Yoshitake Y, Masani K, Shinohara M ; Laser-detected lateral muscle displacement is correlated with force fluctuations during voluntary contractions in humans. *Journal of Neuroscience Methods*. 173(2):271-278. 2008.

[図書] (計1件)

- ① Yoshitake Y, Shinohara M. Steady force control in multiple muscle systems. In: *Advances in Neuromuscular Physiology of Motor Skills and Muscle Fatigue*. Research Signpost, Ed; Shinohara M. Chapter 7. 127-138. 2010.

[学会発表] (計2件)

- ① 吉武康栄. 等尺性力制御課題中における力変動と筋音図波形の関係. 第11回日本電気生理運動学会大会. シンポジウム, 2009年11月7日, 京都大学.
- ② 吉武康栄. 等尺性力調節時における力変動と筋電図波形の類似性. 第64回日本体力医学会大会, 2009年9月19日, 新潟県新潟市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉武 康栄 (YOSHITAKE YASUhide)
鹿屋体育大学・体育学部・講師
研究者番号: 70318822

(3) 連携研究者

篠原 稔 (SHINOHARA MINORU)
ジョージア工科大学・応用生理学部・准教授
研究者番号: 70241213