

平成 21 年 4 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2007～2008  
 課題番号： 19500498  
 研究課題名（和文） 努力感に一致した一次運動野の活動性  
 研究課題名（英文） Activity of primary motor cortex closely correlated with sensation of effort

## 研究代表者

宝田 雄大（TAKARADA, YUDAI）  
 早稲田大学・スポーツ科学学術院・准教授  
 研究者番号：70367093

## 研究成果の概要：

鞆を長く保持すると、その重量が同じであるにもかかわらず、重たく感じる。鞆の保持に求められる運動司令(努力覚、sense of effort)とその結果もたらされる感覚情報(力覚、sense of force)との不均衡が発揮筋力の大きさに対する感覚、力の知覚を増大させ、“重たい”という心像を創出させると考えられている。これには、力覚というよりはむしろ、努力覚がより密接に関与していると以前から指摘されてきた(McCloskey, 1974; 1978; 1981)。

実際、低頻度(0.9Hz)磁気刺激(low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation: lf-rTMS rTMS)による体性感覚野(somatosensory cortex: SI)の機能抑制は力の知覚に何らの変化も与えなかった(Takarada et al., in submitted)が、一次運動野(primary motor cortex: MI)の機能低減は発揮筋力レベルが同じであるにも関わらず、その力の知覚を顕著に増大させた(20～40歳の健常者12名)。つまり、(McCloskeyが予想したように)力の知覚の増大には努力覚が主動的な役割を果たしていることが明らかとなり、さらにその努力覚にはMI自体の、あるいはMIへの出力細胞をもつ領野の神経活動が関与している可能性が示唆された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 健康・スポーツ科学 身体教育学

キーワード： rTMS primary motor cortex somatosensory cortex  
 sense of effort sense of force perception of force

## 1. 研究開始当初の背景

一般に筋疲労は、発揮筋力の大きさに対

する感覚、努力感 (sense of effort) を増大させる。カバンを長く保持すると、たとえその重量が軽くとも、最初に持ったときよりも多少なりとも重たく感じる。このような場合、努力感、筋力発揮の結果生じた、求心性の神経入力というよりはむしろ、その筋力発揮に注がれる運動指令に、より密接に依存し形成されることが知られている (McCloskey, 1978)。

一方われわれは予備実験で、被験者が、ハンドグリップ運動において、上腕基部への局所的な圧迫 (250mmHg の圧をもったカフにより達成される) をともなうと、ともなわない場合に比べて、より大きな努力感を訴えることが分かった。そこで、両側性の重量合わせの方法\* (McCloskey, 1974) により、この局所的な圧迫の努力感に与える影響を調べた。その結果、局所的な圧迫をともなう筋収縮では、常に努力感が顕著に増大することが定量的に確かめることができた (Takarada et al., 2006)。またその際、局所的な圧迫の末梢神経機能に対する影響を調べるため、自然血流下と虚血 (局所的圧迫) 下での正中神経刺激に対する体性感覚誘発電位 (SEP) と M 波の比較をおこなった。正中神経刺激による NAP (nervous action potential) と SEP の N20 (短潜時成分) そして M 波の潜時及び最大振幅は、自然血流下と虚血下で差はなかった。これらのことは、短時間の上腕基部への局所的な圧迫は正中神経機能を阻害しないことが示された。したがって、局所的な圧迫中の努力感の増大、発揮筋力の大きさに対する感覚の増大、は McCloskey (1978, 1981) が推察したように、発揮筋力による求心性の神経入力というよりはむしろ、その筋力発揮に注がれる中枢性の運動指令に起因する可能性が示された。

ところで、大脳皮質一次運動野 (MI) が、この努力感の創出に関連した、中枢性の運動指令の発信源の有力な候補であることは言うまでもない。しかし、これまで発揮筋力の大きさに対する感覚、努力感、が MI の機能と関連して調べられた研究は見当たらない。そこで、中枢神経系内の運動指令の感覚効果 (感覚創出における機能) を調べるために、短時間の局所的な圧迫をともなう筋力発揮中の力の大きさに対する感覚と機能的 (f)MRI による MI 活動との関係を検証した。その結果、MI の活動は圧迫の有無に関係なく、発揮筋力の大きさ

に対する感覚と密接な関係を示したが、両者は、圧迫を伴う筋収縮では、筋力の増加をともなうことなく、顕著に増大することが明らかとなった。これらの結果は、改めて、McCloskey (1978, 1981) の考えを実証するものであった。

### (参考文献)

1. McCloskey, D.I., Ebeling, P., Goodwin, G.M., 1974. Estimation of weights and tensions and apparent involvement of a "sense of effort". *Exp Neurol.* 42, 220-32.  
McCloskey, D.I., 1978. Kinesthetic sensibility. *Physiological Reviews.* 58, 763-820.
2. McCloskey, D.I., 1981. Corollary discharge and motor commands and perception. In: Brookhart, J. M. Mountcastle V. B. (Eds), *Handbook of Physiology*, American Physiological Society, Bethesda, pp. 1415-1447.
3. Takarada, Y., Nozaki, D., and Taira M. Force overestimation during tourniquet-induced transient occlusion of the brachial artery and possible underlying neural mechanisms. *Neurosci Res*, 54(1): 38-42, 2006

## 2. 研究の目的

本研究では、この MI の神経活動と力発揮における努力感との関係を、さらに直接的かつ明確に検証するために、経頭蓋的磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation; TMS) を用いて、局所的な圧迫による努力感の増大に MI の追加的な神経活動が随伴されるか否かを確かめる。

## 3. 研究の方法

20~40歳の健常者 10~12名を対象として、rTMS 刺激前後で、両側の重量合わせの方法 (McCloskey, 1974) \* ) により力の知覚を比較する。

表面筋電図は右 abductor pollicis brevis (APB) と右 flexor carpi ulnaris (FCU) muscles から導出された [2,000 Hz (SYNAMP; Neuroscan, Herndon, VA)]。刺激は、左 MI に磁気刺激装置により 10 分間 (600 total pulses) 与えられた [a Magstim Super Rapid Magnetic Stimulator (biphasic, pulse width of 250  $\mu$ s)]

(Magstim, Whitland, Dyfed, UK)]. Resting motor threshold (RMT) は右 APB の motor-evoked potentials (MEPs) の振幅が  $50 \mu\text{V}$  以上となるに必要な最も低い刺激強度と定義し (Rossini et al., 1994)、本実験の被験者の APB の RMT は最大刺激の  $71.9 \pm 14.5\%$  であった。rTMS 刺激強度は各被験者の RMT の  $90\%$  と設定し、実験に使われた強度は  $63.1 \pm 14.7\%$  (mean  $\pm$  SD) であった。

両側の重量合わせの方法の等尺性筋力発揮レベルは、 $20\%$ ,  $40\%$ ,  $60\%$ , and  $80\%$  of maximal voluntary contraction (MVC)] であった。力 (圧力) は、ストレインゲージ (KFG-5-120-C1-16; Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Tokyo, Japan) により検出され、増幅された (AD240-A; TEAC Instruments Co. Kawasaki, Japan)。座位の被験者は、右手により発揮された力の大きさを、リアルフィードバック用波形表示プログラムソフト及びカラー LCD プロジェクターから構成された視覚的フィードバック専用コンピュータ (IBM T40) 画面から瞬時に確認することができた。両側の重量合わせの方法では、被験者は右手の発揮筋力をパソコン画面より確認することができ、事前に設定された目標筋力レベルのラインにその発揮筋力を合わせることを要求された。またそれと同時に、被験者は左右の発揮筋力が同じになるように指示された。但し、左手により発揮された筋力を被験者は見ることはできなかった。

(\*) 反対側重量合わせの方法

被験者は、モニタの事前に設定された、目標発揮筋力レベルを目指し、右手 (本実験の場合) でハンドグリップ力を発揮する。と同時に、左右のハンドグリップ力が同じになるように左手の力発揮を指示される。しかし、この左手により発揮された力はモニタに力曲線として表されることはない。これは、両側性の重量合わせの方法、Contralateral limb-matching procedure (method) と呼ばれ、従来から発揮された筋力の大きさに対する感覚 (努力感) を客観的に評価するために用いられてきた (McCloskey, 1974)。

#### 4. 研究成果

重さあるいは力の知覚の形成に、運動指令が主動的な役割を果たしていることは以前から指摘されている (McCloskey, 1978)。実際、任意の力を発揮しているときに、脊髄の運動神経細胞の興奮レベルを

変化させて、その力発揮に必要とする運動指令の大きさを変化させると知覚される重さが変化することが知られている (Aniss, 1987)。脊髄の運動神経細胞の運動指令の起源は皮質運動野であり、重さあるいは力の知覚にこの領域の活動が深く関与することは想像に難くない。しかし、これまでの研究は末梢レベルでの研究がほとんどであり、重さあるいは力の知覚と大脳皮質との関連についての研究は行われていない。

一方我々はこれまでに、重さあるいは力の知覚に関する中枢神経機構を明らかにする目的で、発揮筋力に対する力の大きさの感覚、力の知覚、の変化と一次運動野 (MI) の活動との関連について機能的 MRI を用いて調べている。その結果、力の知覚と MI の神経活動との間には高い相関関係が認められ、力の知覚 (力覚) には、筋力発揮による感覚情報 (sense of force) というよりはむしろ、その筋力発揮に必要な運動指令 (sense of effort) がより密接に関係していることが改めて実証された。

本研究では、この力の知覚と MI 神経活動との関係をさらに、直接的かつ明確に調べるために、経頭蓋的磁気刺激法 (repetitive trans cranial magnetic stimulation; rTMS) を用いて、低周波 ( $0.9\text{Hz}$ ) rTMS による MI 神経活動の低減が力覚の変化を伴うか否かを確かめた。20~40 歳の健常者 12 名を対象として、rTMS 刺激前後で、両側の重量合わせの方法 (McCloskey, 1974) を用いて力の知覚を比較した。その結果、左 MI への  $0.9\text{Hz}$  rTMS 後の両側重量合わせの方法による左手の筋力は、有意に増加した {A two-factorial ANOVA with repeated-measured design [Intensity conditions (20, 40, 60, 80%MVC) X three session (Pre- and Post-rTMS, and Recovery)], followed by Bonferroni's post hoc tests, with  $p = 0.05$  [ $F(2,22) = 16.6, p < 0.01$ ]}。したがって、MI 神経活動が力の知覚の表象に重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

#### 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)

[学会発表] (計 1 件)

発表者名: Yudai Takarada, Tatsuya Mima, Masahiro Nakatsuka, Mitsunari Abe, Hidenao Fukuyama, and Masato Taira.

発表標題 : Is it enough for neuronal  
excitability of MI to produce force  
perception?

学会名 : The 30th Annual Meeting of the  
Japan Neuroscience Society

発表年月日 : 2007 年 9 月 10 日 ~ 12 日

発表場所 : 横浜

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

宝田 雄大 ( TAKARADA YUDAI )

早稲田大学・スポーツ科学学術院・准教  
授

研究者番号 : 70367093

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし