

器械体操選手のサルのようなパフォーマンスを可能にする 脳-身体システムの解明

○ 田中 麻奈美* (指導教員 牛山潤一准教授**)

*慶應義塾大学 環境情報学部 4年 (2017年3月卒業予定)

**慶應義塾大学 環境情報学部

*t13577mt@sfc.keio.ac.jp, **ushiyama@sfc.keio.ac.jp

キーワード：両側性支配、運動皮質、経頭蓋磁器刺激

1 背景、目的

私は器械体操部での日々の生活を通じて、上肢のみでの高度な全身バランス制御など、まるでサルのようなパフォーマンスができる器械体操選手の脳-身体システムは、どのように一般人と違うのかに興味を抱いた。本研究では、一般健常者と器械体操選手の脳-身体システムの機能的差異を、神経科学的手法を用いて比較することを目的とする。

ヒトの脳と身体をつなぐ神経経路(皮質脊髄路)は、脊髄の錐体という部分で交叉するため、右半身は左脳が、左半身は右脳が支配している(=対側性支配)。一方、同じ哺乳類でも、サルの前肢運動には、対側のみならず同側の経路も運動制御に関わっている(=両側性支配)(Kandel et al., 2012)。サルからヒトへと進化する過程において、「前肢」は「上肢」として使用され始めたが、上肢の運動制御を担う神経経路は、対側皮質脊髄路にしぼられ、これによって左右肢の個別的な制御や、物を親指と人差し指でつまむなどの精緻な運動を獲得したといわれている。一方、姿勢制御や歩行などの移動行動の機能は、サルは四足で行っていたのに対し、ヒトでは下肢に限定されるようになった。下肢は、左右肢が独立して動くことは稀であり、左右が協調して働くことが多いため、これに有利な両側性支配となっている。

では、上肢を前肢のようにコントロールし、左右を協調的に働かせ、全身のバランス制御を実現している器械体操選手は、下肢のような、サルの前肢のような、両側性支配が運動の神経基盤としてはたっているのではないだろうか。本研究では、このような器械体操選手の運動制御が、進化の過程で機能的に使われなくなった同側皮質脊髄路の再獲得により、上肢の運動制御が再び両側性支配となることで実現されているのではないかと、という仮説のもと、経頭蓋磁気刺激(Transcranial magnetic stimulation : TMS)を用いてこれを検証した。

2 方法

2.1 被験者

実験は、男子器械体操選手8名(18歳~36歳)、一般健常男性6名(21歳~27歳)を対象に行われた。男子器械体操選手7名は、競技歴8年以上、インカレに出場経験のあるレベルの高い選手を対象とした。残りの1名は、かつて日本代表として、オリンピックにて、男子体操団体優勝経験のある元トップ選手であった。一般健常男性は、器械体操の経験がない者とした。その他スポーツ歴や運動習慣については、制限をしていない。

また、ヘルシンキ宣言(ヒトを対象とする医学研究の倫理的原則)に基づいて作成された説明書を用いて、本研究に関する十分な説明をしたのち、同意の得られた者のみに協力を得た。なお、本実験のプロトコルは、慶應義塾大学総合政策学部・環境情報学部における実験・調査倫理委員会の承認を得ている(受付番号116)。実験前後と実験内のインターバルにおいて、被験者の体調確認もおこなった。

2.2 計測方法

被験者の両側上肢の、第一背側骨間筋(First Dorsalis Interossei, FDI)、橈側手根伸筋(Extensor Carpi Radialis, ECR)、上腕二頭筋(Biceps Brachii, BB)、三角筋(Deltoid, DEL)より、表面筋電図を導出した。TMSにより、外部から強制的に皮質脊髄路の電気的活動を促し、筋電図上にあらわれる運動誘発電位(motor evoked potential : MEP)を計測した。

2.3 手順

被験者には、椅子に座ってもらい、出来る限りリラックスした姿勢をとってもらった。

非利き手の一次運動野のFDIの支配領域を探索し、刺激位置として確定した。運動閾値(Motor Threshold : MT) (50%以上の確率で50 μ VのMEP振幅を誘発できる最低の刺激強度)を探索し、その1.5倍の強度で10回刺激した。

2.4 解析方法

解析は MATLAB で作成したプログラムにてすべておこなった。各被験筋について、10 回分の MEP データを加算平均処理した。定量評価指標としては、MEP 波形の最大値と最小値の差分 (MEP 振幅) ならびに刺激から応答までの時間 (MEP 潜時) を評価した。MEP 潜時に関しては、刺激前の安静状態の MEP の平均と標準偏差をもとめ、その 3 倍を閾値として設定し求めた。

3 結果

3.1 MEP 振幅

2 名の男子器械体操選手については、対側の各筋とともに、同側 DEL にも、顕著な MEP が出現した (図 1)。一方、8 名中 6 名の男子器械体操選手 (図 2) と、一般健常者 (図 3) は、対側の各筋の MEP 振幅は得られたが、同側はすべての筋において MEP 振幅は得られなかった。

3.2 MEP 潜時

先行研究において、対側の上腕の MEP 潜時は 13–15ms といわれているが (Tazoe et al., 2014)、同側 DEL の MEP 振幅が確認できた 2 名の MEP 潜時は、5–7ms で、一般的に言われている時間の半分以下と、驚異的に短かった。同側 DEL の MEP が出現しなかった選手の中でも、対側 DEL の MEP 潜時が 8ms と短い選手もいた。一見、異常な短さではあるが、神経伝達速度は平均 58m/s といわれ、一次運動野の領域から DEL までの距離は 30–35 cm 程度のため、単シナプス結合であれば可能な時間である。

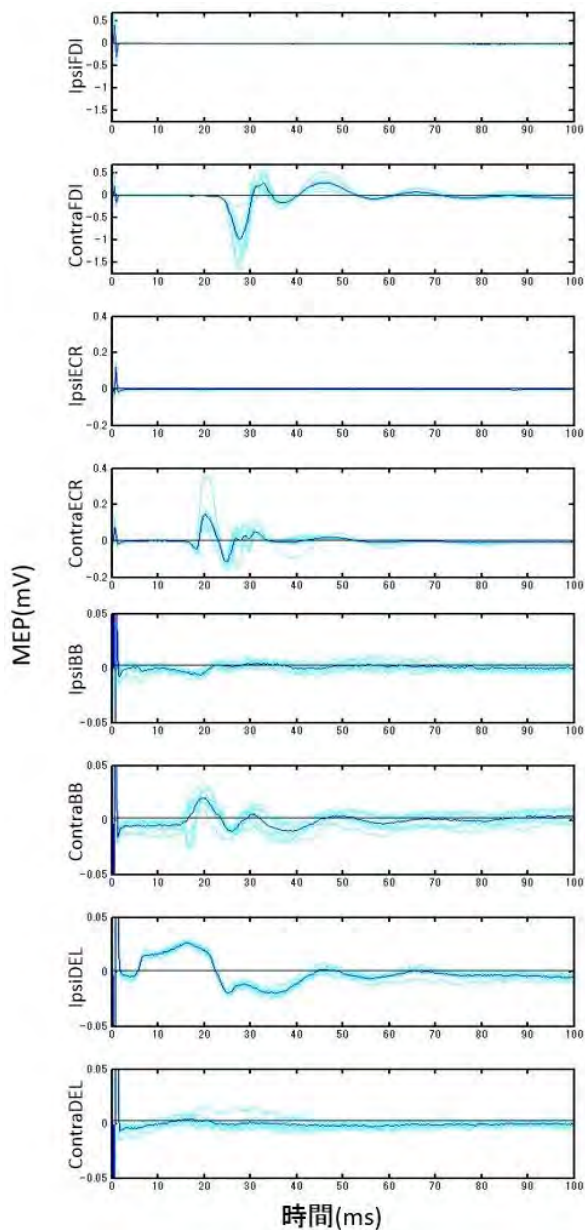


図 1 : MEP 波形 (男子体操選手 (同側 MEP あり))
上から順番に、刺激部位と同側 (Ipsi) 対側 (Contra) の FDI、ECR、BB、DEL の MEP 波形を示す。時刻 0 は刺激時刻を示す。

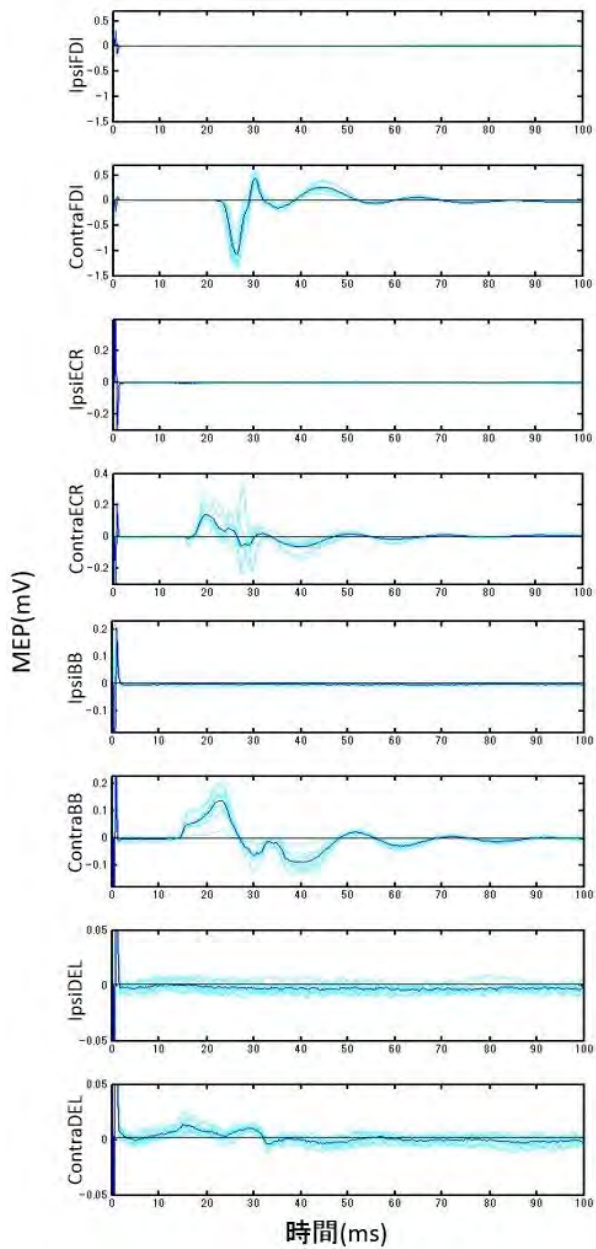


図 2 : MEP 波形(男子体操選手(同側 MEP なし))

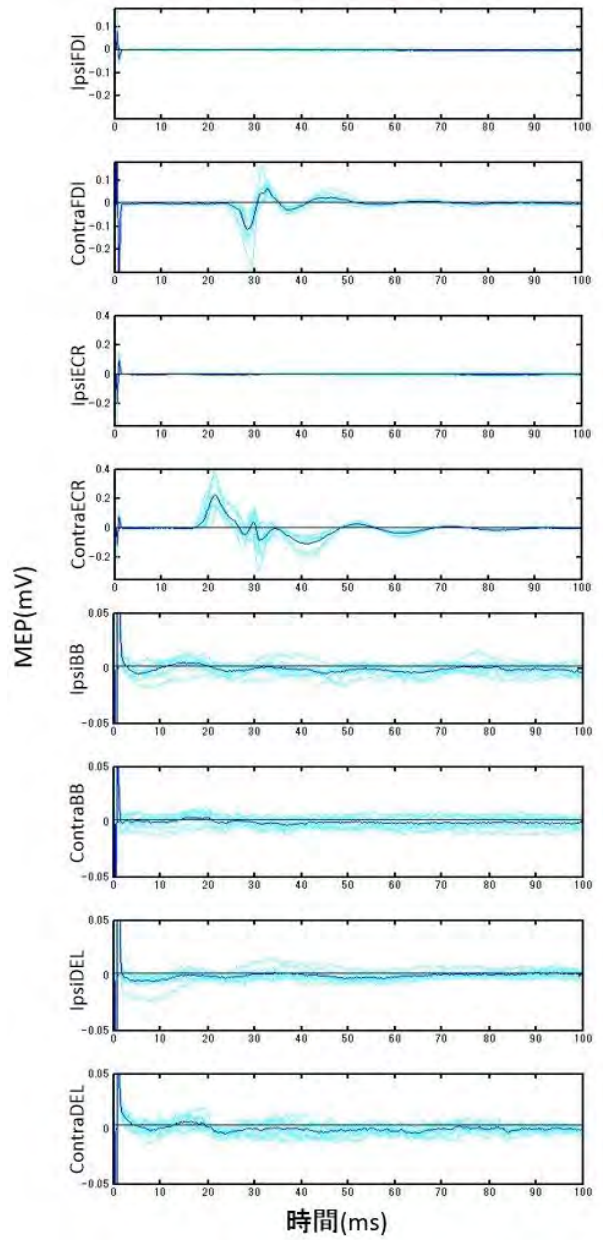


図 3 : MEP 波形(一般健常男性)

4 考察

4.1 MEP 振幅・MEP 潜時

3の結果より、男子器械体操選手2名から同側 DEL の MEP 振幅が得られたが、ほか6名は得られなかった。このことから、器械体操を長年続けていれば、誰もが同側皮質脊髄路が再賦活化するわけではないことが分かった。

MEP 潜時に関しては、とくに同側 DEL の MEP が観察された2名の体操選手において、非常に短い値を示した。これは、皮質と筋との間の結合が単シナプス性のものである可能性を示唆する。高度な運動制御を行うためには、すばやい運動の修正が必要であるため、このような経路を可塑的に獲得した可能性がある。

4.2 体操競技力との関係性

同側 DEL の MEP が得られた2名のうち、1名は元オリンピック金メダリスト、1名も全日本選手権出場者と競技レベルが高いことから、同側皮質脊髄路の再賦活化は、ある程度競技レベルに比例する可能性がある。特に、吊り輪や鞍馬のように、不安定な場所で左右同時に強い力を発揮したり、歩行のように左右交互に支持しながらバランスをとる種目の熟達度が関係してくる可能性があるのではと考えている。

吊り輪の場合、宙吊りにされた2本の輪にぶら下がり、様々な技をおこなう。ただぶら下がるだけでもかなりの力を必要とするが、その状態で技を行う際には、宙吊りの輪を固定するための左右協調した強い力と、バランスを保つための素早い運動の修正が必要である。同側の皮質と近位筋の単シナプス経路が再賦活化することで、運動指令から運動実行までの時間が短くなり、これによって瞬時的なバランス制御を効率化しているのではないかと考えられる。

鞍馬の場合、基本的に左右交互に支持をし、バランスをとりながら技を行う。その際に鞍馬上を移動することも多い。これは歩行の動きを上肢で行っているようにも見える。歩行のように左右交互に支持をするにあたって、高度な技になればなるほど左右肢間干渉は必要不可欠であると考えられる。これを実現するうえにおいても、同側皮質脊髄路が再賦活化し、筋が両側性に支配されるようなシステムは都合がいいのではないだろうか。

4.3 今後の検討課題

今回の実験では、非利き手の一次運動野の FDI の領域を刺激して、両側の筋から MEP を計測した。その結果、器械体操選手8名中2名の同側 DEL への MEP が計測できた。しかし今回の実験では、利き手の一次運動野刺激はおこなっていないため、同様の両側性支配が起きているのかは確認しきれていない。また、被験者数が少なく、同側 DEL の MEP が確認できたのは2名しかいないことから、上述の競

技力との関係性を検討するためには、より多くのデータを集める必要がある。

また、今回は安静時に TMS 刺激をおこない MEP を計測する手法をとったが、これはあくまでも刺激によりニューロンを強制的に発火させているにすぎず、随意運動中の脳活動と筋活動の対応関係を検討しているわけではない。機能的評価のためには、脳波や筋電図を用いた電気生理的検討をおこなう必要がある。

このように、データの不足などはあるものの、今まで健康成人の上肢への同側 MEP が計測されたことはなく、今回の実験でこれが計測できたことの意味は大きい。

4.4 結論

本実験では2名のみではあるが、同側 DEL への MEP 振幅が得られた。データ数が不十分であることや、機能的評価をするには追実験をおこなう必要はあり、まだ推測の域を出ないが、器械体操選手のサルのようなパフォーマンスを可能にするには、サルからヒトへ進化する過程で捨ててきた同側皮質脊髄路の再賦活化が起きている可能性が示唆された。

5 引用文献

(1)Kandel E, The Functional Organization of Perception and Movement, Principles of Neural Science, Chapter 16, p353-365, 2012.

(2)[Tazoe T, Perez MA.](#) Selective activation of ipsilateral motor pathways in intact humans. [J Neurosci.](#) 34(42): 13924-13934, 2014.

(3)Bawa P, Hamm JD, Dhillon P, Gross PA. Bilateral responses of upper limb muscles to transcranial magnetic stimulation in human subjects. *Exp Brain Res* 158: 385-390, 2004.