

運動システム神経活動と筋力との関係 ～fMRI 研究～

Relationship between motor system activation and handgrip strength: A functional MRI study

身体運動科学研究領域

5012A031-8 清水 美彰

研究指導教員：宝田 雄大准教授

【序論】

これまでに様々な手法を用いて、運動システムの神経活動と筋力との関係が調べられ、それらの間には比例関係があることが分かっている。サル的一次運動野 (M1) における単細胞記録によると、発射頻度と発揮張力との間に正の直線関係が示されている (Everts, 1968)。陽電子放射断層撮影 (PET) の研究では、示指の屈曲筋力と運動関連脳領域 {感覚運動野 (SM1)、補足運動野 (SMA)、帯状回 (CG)、小脳 (CBL)} の血流量の増加との間には比例関係があると報告した (Dettmers et al 1995)。脳電図 (EEG) によって導出される SM1 と SMA の運動に関連した皮質性電位 (MRCP) は、等尺性筋力および筋電図 (EMG) との間に相関関係があることが分かっている (Siemionow et al 2000)。1992 年以降、非侵襲と空間分解能の高さから増加の一途をたどっている機能的 (f) MRI のヒト脳機能研究データにおいても、それまでの運動関連脳領域の神経活動と筋力との比例関係が確認され、支持されている。

(Liu et al 2000, Duinen et al 2008, Tejin et al 2014)。近年、動きの拘束が少なく、簡便に測定できる近赤外線分光法 (NIRS) を用いた研究も、運動関連脳領域の神経活動と筋力との間に相関関係があると報告されている (Derosiere et al 2012)。

fMRI を用いた運動関連脳領域の神経活動と筋力との関係を調べるためには、高磁場のパルスシーケンスの筋力および筋電図波形への干渉と、筋力・筋電図システムによる fMRI の磁場の均一性とノイズ発生を抑える必要がある。これまでの MRI 研究では、fMRI 環境に準拠した水圧式握力計 (Liu et al 2001)、空気圧式握力装置 (Diciotti et al 2007) が開発され、使用された。しかし、水圧式と空気圧式の筋力測定装置の難点は、発揮筋力レベルが低い場合に測定できないことや発揮筋力を素早く目標の筋力に合わせられないことなど、測定装置の低いデータの解像度が挙げられる。一方、ひずみゲージ式の筋力装置はそのような難点はなく、ひずみゲージの定期的な較正を行えば半永久的に使用が可能である。Duijn ら (2008) は、ひずみゲージ式の示指屈曲筋力測定装置を用いて、筋力と運動関連脳領域の神経活動との関係を fMRI で調べ、筋力と

筋電図波形への fMRI パルスシーケンスによる影響はないと結論付けた。しかし、MRI 室外で筋力と EMG を測定し、MRI 室内の場合と比較していないことから、fMRI パルスシーケンスによる筋力および EMG 波形への干渉の有無がわかっていない。

そこで、本研究の目的はひずみゲージ式の握力装置を用いて、① fMRI パルスシーケンスと筋力および EMG の波形が相互に与える影響を調べるために、MRI 室内外の筋力と EMG の関係を比較し、②Liu らが示した筋力と運動関連脳領域の活動との正の相関関係の有無を fMRI 装置で調べることである。

【方法】

対象は、神経疾患もしくは精神疾患といった既往歴のない 16 名の健康者 (男性 9 名、女性 7 名、年齢 22.6 ± 1.6 歳) である。本実験は、MRI 室内と室外で測定した筋力と EMG の関係を比較するために、2 つの実験を行った。実験 1 では MRI 室外で、タスク中に握力と EMG を測定し、実験 2 では MRI 室内で、fMRI 測定中に運動関連脳領域の活動と握力、EMG を測定した。

タスク：対象者には、仰臥位で目標の筋力を見ながら、右手で発揮した握力を 5 段階の目標の筋力 {最大筋力 (MVC) の 20%、35%、50%、65%、80%} に 22 秒間合わせてもらった。タスクを行う前にウォームアップと MVC を行った。

測定：ひずみゲージ式の握力計で握力を測定した。ひずみゲージは非磁性体の金属で構成され、コードは二重にシールドされた。握力の主働筋である深指屈筋 (FDP) と拮抗筋である指伸筋群 (ED) から EMG を測定した。fMRI は M1、高次運動野 {運動前野 (PM)、SMA、帯状皮質運動野 (CMA)}、CBL を測定した。

解析：握力と EMG は fMRI パルスシーケンスの影響がなく、握力が目標の筋力に到達し、安定した期間の 1 秒を解析した。握力は平均し、MVC に対して標準化した。全波整流した EMG を時間積分し、MVCEMG に対して標準化した。最後に握力と EMG は全対象者に対して平均した。fMRI の相対的なシグナル変化は SPM5 を用いて、前処理、個人解析、集団解析を行った。

統計:MRI 室内外における筋力と EMG の関係を比較するために、線形回帰分析を行い、傾きと y 切片を求めた後に、それぞれの値に対して共分散分析 (ANCOVA) を行った。交互作用が認められない場合は 2 グループの平均値を比較した。握力と EMG の関係、運動関連脳領域の活動と握力および EMG の関係を調べるために、Pearson の相関係数を求めた。統計処理で用いた有意水準はいずれも 5 %未満とした。2 mm以上のヘッドモーションが生じたため 2 名のデータを除外した。

【結果と考察】

図 1 は MRI 室内外の筋力と EMG の関係を示す。統計の結果、FDP と ED の両被験筋において、筋力と EMG の関係は MRI 室内と室外で交互作用はなく [FDP : $F_{1,23}=0.462$ 、Effect size : $\eta^2=0.020$ 、 $P=0.763$ 、ED : $F_{1,23}=0.781$ 、Effect size : $\eta^2=0.034$ 、 $P=0.541$]、有意な差は認められなかった [FDP : $F_{1,25}=0.944$ 、Effect size : $\eta^2=0.002$ 、 $P=0.817$ 、ED : $F_{1,23}=0.309$ 、Effect size : $\eta^2=0.014$ 、 $P=0.584$]。また、両筋群の筋力と EMG の関係は MRI 室内と室外とともに相関関係が見られた。

図 2 は M1 の神経活動と筋力および EMG との関係を示す。握力はすべての運動関連脳領域の活動と正の相関関係があることが示された。また、EMG と運動関連脳領域との間に正の比例関係があることが認められた。

以上のことから、fMRI パルスシーケンスとひずみゲージ式の握力計で測定した筋力および EMG の波形が相互に影響を与えていないことが示され、本実験で用いられた視覚フィードバックシステム、筋力測定システム、筋電図システムは、fMRI 脳機能と筋力と筋電図の同時測定が可能であることが分かった。また、筋力と fMRI による M1、PM、SMA、CG、CBL の神経活動との間に比例関係が示され、先行研究の結果 (Liu et al 2000、Duinen et al 2008、Tejin et al 2014) が追認された。

今後は、fMRI 用に開発された視覚・筋力・筋電図システムを用いて、最大筋力あるいは潜在筋力発揮時の脳機能画像を取得し、それらに関わる脳領域の活動特性を明らかにしたい。

【結論】

- ① fMRI 用に開発されたひずみゲージ式筋力測定システム、視覚フィードバックシステム、筋電図システムは fMRI 脳機能と筋力と筋電図の同時測定を可能とする。
- ② 運動システム神経活動は、20%~80%MVC の筋力と正の相関関係がある。

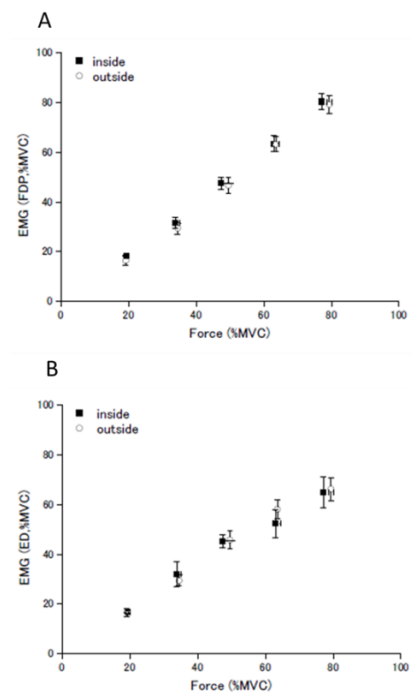


図 1 : MRI 室内外の筋力と EMG の関係 ■は MRI 室内を、○は MRI 室外を示す。すべての値を最大筋力発揮時の握力と EMG の相対値として示した (平均±SE)。

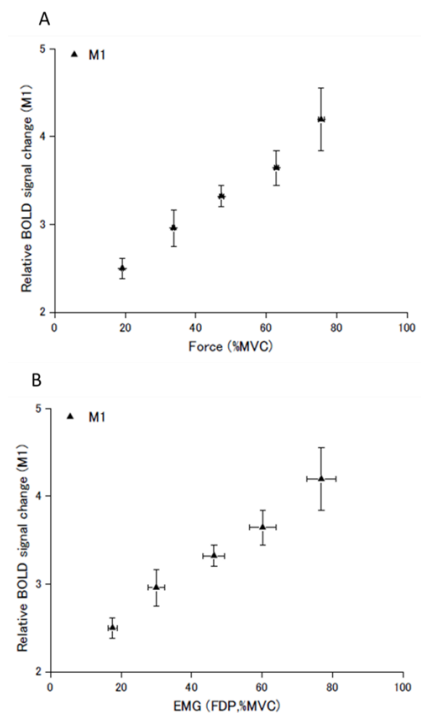


図 2 : M1 の神経活動と筋力および EMG との関係。A M1 の神経活動と握力の関係。B M1 の神経活動と深指屈筋の EMG の関係。握力と EMG の値を最大筋力時の握力と EMG の相対値として示した (平均±SE)。M1 の相対的な BOLD シグナル変化は安静時に対する MR 信号のシグナル変化として表した。