

脳-身体システムと環境のインタラクションによる柔軟な運動制御を「皮質-筋コヒーレンス」から解明する

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 修士課程2年（助成時）
慶應義塾大学 SFC 研究所 上席所員（現在）

鈴木 里奈

背景・目的

我々の生活する環境は時々刻々と変化する。これに対応するため、我々はつねに環境とのインタラクションを通し、柔軟に運動を調整する必要がある。それを可能にするのは「脳-身体」が一丸となったシステムで、脳から筋へ下行する「運動指令」と、筋から脳へ上行する「感覚情報」が鍵となる。

まず、運動を開始する際は、脳内で構築された「運動計画」をもとに、脳（運動皮質）が「運動指令」を筋へ送ることで身体運動が実現する。たとえば眼球運動やゴルフのショット等の瞬間的な運動は、このように単発の運動指令によって実行される。しかし、我々の身体運動は完璧ではないため、実運動と目標の間には誤差が生じることがほとんどである。日常的におこなわれる連続性のある運動において、運動誤差を放置することは、目標運動が達成されない状態を意味する。そこで、運動実行時の「感覚情報」を脳にフィードバックすることで、運動指令が目的に合わせて修正される。この脳と筋の情報交換は「感覚運動統合」として提唱されており、我々がおこなう柔軟な運動制御の実現に不可欠であると考えられる。

一方で従来の運動制御研究は、脳もしくは身体のどちらかに焦点を絞って実施したものが多く、脳-身体システムの視点は不十分であった。そこで本研究は、脳と身体を切り分けず、双方のシンクロ性を評価する「皮質-筋コヒーレンス」に着目した（図1）。そして、運動初期から維持期における「一連の運動の流れ」を考慮した上で、脳と筋がどのようにふるまいながら運動を制御するかを検討した。それを実現するために、本研究では、被験者に要求する運動課題を多様化し、誤差修正時の脳と筋のシンクロ現象（＝皮質-筋コヒーレンス）を評価することで、環境に依存した柔軟な感覚運動統合の生理学的なメカニズムの解明を目指した。

方法

本研究のベースとなった申請者の過去の研究では、筋収縮の方法が脳と筋に与える影響を検証した。被験者は最大努力の10%・15%で、従来の研究で用いられてきた「持続的」な筋収縮課題（70秒）と、本研究オリジナルの「断続的」な筋収縮課題（6秒収縮-14秒弛緩のリズムの繰り返し）をおこなった。なお断続的課題では、被験者は急峻な筋発揮が求められ、ふたつの収縮強度は試行

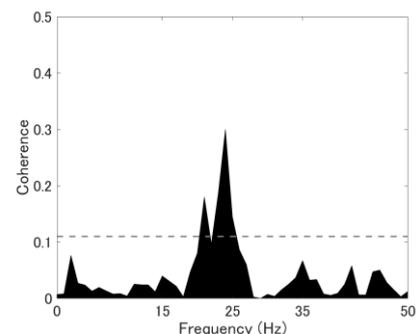


図1. 運動時の脳波と筋電図の同期性を示す「皮質-筋コヒーレンス」の典型例. 同期現象は20Hz 近辺でみられることが多い。

ごとにランダムに提示された。結果として、断続的課題では、弱い収縮強度（10%試行）において有意に大きな皮質-筋コヒーレンスが確認された。これは、「低-中強度による筋収縮では収縮強度による皮質-筋コヒーレンスの差は生じない」とする先行研究（Brown et al., *J Neurophysiol* 1998; Mima et al., *Neurosci. Lett.* 1999, Ushiyama et al., *J Appl Physiol* 2012）の知見を覆すものである。よって筋収縮の方法により、脳と筋のシンクロ性に差異が生じることが明らかになった。この知見をもとに、本研究では実験ごとに運動の条件を設定した。

結果

まず実験 A では、上述の研究の最大努力を 10% と 25% に設定し、収縮強度間の差を広げても、同様の知見が担保されるかを検討した。結果として、断続的課題の弱い収縮強度（10%試行）で有意に大きな皮質-筋コヒーレンスが確認された（図 2）。さらに、急峻な筋発揮によって生じた「初期運動誤差」の大きさおよび試行間のばらつきも、10%試行で有意に大きいことが確認された。したがって、収縮強度間の各指標の有意差は「断続的課題」で生じることが判明し、以降の実験では、課題の提示方法や筋収縮の速度など、どの要素が有意差に寄与したかを検討した。

実験 B はふたつの収縮強度（10%・15%）をランダムに提示せず、ひとつの収縮強度の断続的収縮に繰り返しに取り組む課題をふたつの収縮強度で別々に実施した。すると、収縮強度間の皮質-筋コヒーレンスの差は消失した。この結果から収縮強度間の差は、筋収縮の様式自体が生み出したのではなく、試行のランダム化が一因であることが示唆された。

最後に実験 C では、断続的課題を急峻ではなく「ゆるやかに」おこなうように設定した。なお、ふたつの収縮強度（10%・15%）は試行ごとにランダムに提示させた。その結果、収縮強度間の皮質-筋コヒーレンスの有意差は確認されなかった。したがって、急峻な筋発揮で顕著な初期運動誤差が生じやすい状況も、収縮強度間の皮質-筋コヒーレンスの有意差に影響することが考えられた。

考察

これらの実験結果と考察をまとめると、先行研究では低-中強度の筋収縮では生じないとされていた皮質-筋コヒーレンスの収縮強度間差は、被験者が直面する「運動の文脈」次第で生じることが本研究で明らかになった。具体的には、急峻な筋発揮を断続的に求められる環境下で、異なる収縮強度による試行がランダムに提示される場合に、弱い収縮強度の試行で有意に大きい結果となった。一方で、急峻な筋発揮でもひとつの運動出力を単調にくりかえす場合や、ゆるやかな立ち上げをおこなう場合は、この差は消失した。これらの知見から、断続的かつ急峻な筋収縮を試行のランダム化下でおこなう「文脈」が組み合わせられた際に、より初期の運動出力が不正確かつ不安定になり、これをオンライン修正するために脳と筋のシンクロ性が高まることが示唆された。

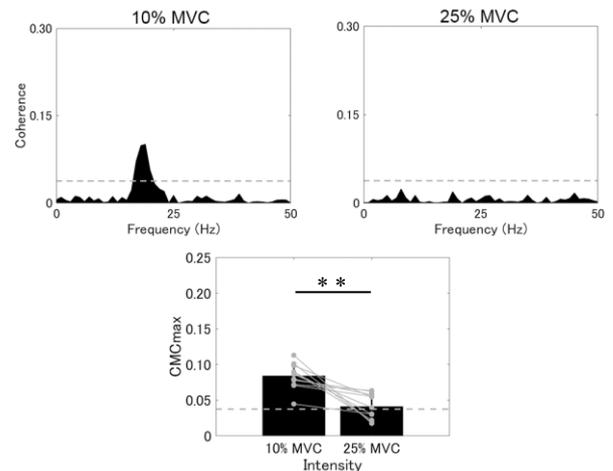


図 2. 各収縮強度の皮質-筋コヒーレンスの典型例（上段）およびグループデータ（下段）. ** $p < 0.01$.