

論文の内容の要旨

論文題目 The Switching Mechanism of Muscle Synergies for Lower Limb Control
(下肢制御における筋シナジーの切替機序)

氏 名 鈴木 崇 人

ヒトには約 400 個の骨格筋があり、一つの運動に対しても多様な運動パターンを可能にしているが、同時に中枢神経系は膨大な筋の自由度を制御しなければならない。このヒトの身体が持つ冗長性問題に対して、一定の割合で活動するグループ(筋シナジー)として複数の筋をまとめて制御し、筋シナジーごとに動員することで自由度を減らしているのではないか、という仮説が提唱されている。この筋シナジー仮説では一つの筋は複数の筋シナジーに属することがあり、動員される筋シナジーが替われば、それに合わせて筋活動も変化するとされている。

この仮説は、脊髄を刺激する研究や筋電図を用いたヒトの随意運動の研究によって支持されてきたが、この仮説を厳密に証明または否定することは難しい。ヒトの随意運動において筋シナジーが使用されていることを確認するためには非侵襲的な実験が不可欠であり、筋電図学的研究によって多様な随意運動が対象とされてきた。しかし、実際の運動は物理的な拘束条件の影響を受けてしまう。物理的な拘束条件を達成するように筋シナジー以外の動員規則に基づいて筋活動が決定されていたとしても、神経的な拘束である筋シナジーと誤解する危険性が指摘されている。例えば、筋シナジーを仮定しなくても「筋活性度の 2 乗和」などの目的関数の最適化を用いれば、筋シナジーのような一定の割合でのまとまった筋活動がある程度予測されることを歩行のシミュレーションなどは示している。筋シナジーが随意運動において使用されていることを明らかにするためには、対象とする随意運動の物理的な拘束条件を明らかにした上で、物理的な拘束条件により決定される筋活動の組合せの数と、記録された筋活動の組合せの数を比較する必要がある。

また筋活動の変動に対して非制御多様体(Uncontrolled Manifold: UCM)解析を行った研究では、第二指周りの各筋の活動の分散が、第二指による力を変化させる部分空間よりも変化させない部分空間に大きいことが報告されている。この現象に対して、目的の力が全体として発揮できている場合にはそれ以上の筋活動の制御がなく、複数の筋が一定の割合で動員されているのではなく、個々の筋が個別に動員される可能性を示唆している、という解釈もされている。つまり、この現象は、ヒトの随意運動において筋シナジーが使用されていることを否定する一つの証拠として捉えられている。しかし、力を変えない方向への筋活動の変動がランダムではなく規則性を持っている可能性があり、筋活動の変動の規則性を明らかにすることで UCM 解析の結果と筋シナジー仮説との矛盾を解消し、筋シナジーの動員原理を明らかにできる可能性がある。

以上のように、ヒトの随意運動において筋シナジーが使用されていることは十分に明らかにされていない。そこで本研究は、ヒトの下肢の随意運動において筋シナジーが使用されていること、及び、筋シナジーの動員原理の 2 点を明らかにすることを目的とした。この目的のために、第 1 章で筋シナジー仮説が形成された歴史的背景を確認した後、第 2 章と第 3 章 1・2 節と第 4 章にわたり四つの実験を行った。

第 2 章では、随意的等尺性足底屈において足底屈筋群の活動が筋シナジーに依存することと、その強度依存性を明らかにすることを目的とした。そのために、足底屈を単独で行った場合の筋活動と、完全伸展位での等尺性膝伸展を同時に行った場合の足底屈筋群の活動を比較した。健康な成人男性 10 名を対象に、外側広筋、大腿直筋、大臀筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭と外側頭、そしてヒラメ筋の活動を表面筋電図法により記録した。随意最大収縮(Maximal Voluntary Contraction: MVC)時の足底屈トルクと膝伸展筋群の筋活動を基準に、足底屈強度は 10% MVC から 100% MVC までの 10 段階を、膝伸展強度は 0%, 50%, 100% MVC の 3 段階を用意し、これらを組み合わせた 30 条件をそれぞれ 3 秒以上行った。このような実験では膝伸展筋群の活動は物理的な条件を変えないため、物理的な拘束条件は一定とされた足底屈トルクのみである。そのため、この条件下での足底屈筋群の活動の変化には三つの可能性がある。一つ目は筋シナジーが存在しない場合で、その時には足底屈筋群は一定の割合で活動することなく各筋の活動がランダムに決定される。二つ目は筋シナジーが足底屈筋群に対して一つだけ存在する場合で、ある筋の活動と別の筋の活動をプロットした 2 次元グラフ上に一本の回帰直線となって表れる。しかし、この場合は物理的な拘束条件の数と一致するため、物理的な拘束条件を達成するように筋活動が決定されているだけで筋シナジーではない可能性を残す。三つ目は筋シナジーが足底屈筋群に対して明確に二つ以上存在する場合であり、その規則性は 2 次元グラフ上に二本以上の回帰直線となって表れる。解析は、記録した各筋の表面筋電図から筋電図平均振幅(Average Rectified Value: ARV)を計算し、下腿三頭筋の各 ARV 間の比例関係を折れ線回帰で表現した。また全ての筋の ARV に対して非負値行列分解(Non-negative Matrix Factorization: NMF)を行った。

実験の結果、高い足底屈強度においては下腿三頭筋の ARV 間の回帰直線の傾きは有意に変化

しなかったが、低い足底屈強度において足底屈単独の場合と膝伸展との同時動作の場合で、下腿三頭筋の ARV 間に異なる二本の回帰直線が表れた。また NMF の結果から、この二本の回帰直線を再現するためには、膝伸展筋群を主とする筋シナジー以外に下腿三頭筋を主とする筋シナジーが最低二つ以上必要であることが明らかになった。下腿三頭筋に二つ以上の筋シナジーが必要なことは実験の物理的拘束条件によって筋活動が決定される場合の数を超えており、随意的足底屈運動において筋シナジーが使用されていることが示唆された。

第 3 章では、第 2 章において足底屈強度が低い時に筋シナジーの存在を強く示唆する特徴的な筋活動がみられたため、10%・20%・30%MVC の等尺性足底屈を詳細に検討した。それぞれの強度の足底屈中に 15 秒ずつ膝伸展強度を変え、0%・50%・100% MVC の等尺性膝伸展を完全伸展位でランダムに行った。第 3 章 1 節では、健常な男性 10 名を対象に大腿直筋、大臀筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭と外側頭、そしてヒラメ筋の活動を表面筋電図法により記録し、ARV を計算した。その結果、膝伸展と低強度足底屈の同時動作時には、腓腹筋内側頭の ARV は有意に減少し、ヒラメ筋の ARV は有意に増加することが明らかになった。

第 3 章 2 節では、足底屈筋群と足背屈筋群の活動が筋シナジーに依存し、筋シナジーの動員が UCM の原理に従うことを明らかにした。健常な成人男性 6 名を対象に大臀筋、大腿二頭筋、大腿直筋、外側広筋、前脛骨筋、長腓骨筋、短腓骨筋、腓腹筋内側頭と外側頭、そしてヒラメ筋の活動を記録し、足底屈筋群と前脛骨筋の 6 筋の ARV の変動に対して UCM 解析を行った。また全ての筋の ARV に対して NMF を行い、筋シナジーの動員量を変化させる部分空間上の ARV の分散を計算し、NMF により定量した筋シナジーの動員量の変動に対しても UCM 解析を行った。その結果、ARV の分散は、足底屈トルクを変化させる部分空間よりも変化させない部分空間に有意に大きく、先行研究と同様の結果が得られた。さらに、ARV の分散は筋シナジーの動員量を変化させる部分空間に最も大きいことが明らかになり、足底屈筋群と足背屈筋群の活動が筋シナジーに依存することが示唆された。また筋シナジーの動員量の分散は、足底屈トルクを変化させる部分空間よりも変化させない部分空間に有意に大きく、筋シナジーが UCM の原理に基づいて動員される可能性が示唆された。

第 4 章では、健常な成人男性 9 名を対象に、随意最大努力の等尺性足底屈を単独で行った場合と完全伸展位での膝伸展との同時動作の場合における下腿三頭筋の随意活性度の違いを電気刺激(Interpolated Twitch)法により評価した。また外側広筋、大臀筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、長腓骨筋、腓腹筋内側頭と外側頭、そしてヒラメ筋の活動を表面筋電図法により記録し、ARV を計算した後 NMF を行って、膝伸展筋群と足底屈筋群の相互作用を筋シナジーとして定量した。その結果、足底屈を単独で行った場合と比較して膝伸展との同時動作時には、膝伸展筋群と足底屈筋群を含む筋シナジーの動員量が有意に増加し、腓腹筋内側頭とヒラメ筋の ARV だけでなく電気刺激法により評価した下腿三頭筋の随意活性度も有意に増加した。さらに、足底屈トルクも有意に増加した。以上より、最大努力による下腿三頭筋の力発揮には膝伸展筋群と足底屈筋群を含

む筋シナジの動員が重要であることが明らかになった。

第5章では本研究を総括した。膝伸展筋群の活動がある場合とない場合で、低強度の足底屈中の下腿三頭筋の活動は変化した。この変化には足底屈筋群を主とする筋シナジが二つ以上必要であり、一定の足底屈トルクを発揮するという物理的な拘束条件の数を必要な筋シナジの数が超えた。足底屈筋群の活動の変動は、足底屈トルクを変化させる部分空間や変化させない部分空間より筋シナジの動員量を変化させる部分空間に大きかった。さらにNMFによって定量した筋シナジの動員量の変動は、足底屈トルクを変化させる部分空間よりも変化させない部分空間に大きかった。以上の結果より、随意の足底屈運動において筋シナジが使用されていることが明らかになり、足底屈筋群を主とする筋シナジの動員がUCMの原理に従うことが示唆された、と結論づけた。