

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 木村 聡貴

論文題目： Volitional and reflexive neural control mechanisms of muscle relaxation in humans
(ヒトの筋弛緩に関する随意性および反射性神経制御メカニズム)

ヒトは、筋活動の増減、すなわち筋収縮と筋弛緩、をたくみに組み合わせて合目的な身体運動を行うことによって生活している。しかしながら、ヒトの筋活動メカニズムに関する先行研究の殆どは、筋収縮に関するものであり、筋弛緩についてはあまり着目されてこなかった。しかし、ある種の脳疾患では収縮は異常を示さず弛緩に困難を生じることや、スポーツ動作において非熟練者や心理的動揺時に動作終了後の筋弛緩が緩慢となることなどの臨床事実が最近報告されており、筋弛緩が単なる筋収縮指令の停止に伴う受動的付随現象ではないことが示唆されているが、そのメカニズムは未解明であった。本論文は、筋弛緩に関する神経制御メカニズムに焦点を当てて申請者が行った研究成果をまとめたものである。論文は、第1章に先行研究のレビューおよび方法論を、第2章から第6章に実験結果を、第7章に総括論議をまとめて構成されている。

得られた実験結果の概要は次のとおりである。

1. 実験1 (第2章：上肢筋における筋収縮・弛緩期の皮質脊髄経路の興奮性)

健常成人に、等尺性肘関節屈曲トルクを漸進的に増減させる課題を行わせ、上腕二頭筋、腕橈骨筋（主働筋）および上腕三頭筋（拮抗筋）から表面筋電位（EMG）を導出した。課題遂行中に、頭部運動野上に経頭蓋磁気刺激（TMS）を与え、各筋に発現する誘発筋電位（MEP）を記録した。その結果、同等トルク発揮時の筋活動量は、主働筋、拮抗筋とも、トルク上昇期（収縮期）に比べて減少期（弛緩期）に低下し、さらに、同等筋活動量あたりの主働筋 MEP もまた弛緩期に低下するという、二重ヒステリシス現象が明らかとなった。

2. 実験2 (第3章：下肢筋における筋収縮・弛緩期の皮質脊髄経路の興奮性)

実験1と同様の実験を下肢について実施した。すなわち、等尺性足関節底屈トルクを周期的に増減させ、ヒラメ筋、腓腹筋（主働筋）および前脛骨筋（拮抗筋）から EMG 及び MEP を導出した。その結果、上肢と同様、同等トルクあたりの主働筋活動量は、収縮期に比べて筋弛緩期で減少し、かつ同等筋活動量あたりの主働筋 MEP も、弛緩期で低下した。さらにまた、拮抗筋の MEP は主働筋とは逆に弛緩期に有意に増大したことから、拮抗筋の皮質脊髄経路の興奮性は、弛緩期で増大していることが示された。

3. 実験3 (第4章：筋収縮・弛緩期の脊髄運動ニューロンプールの興奮性)

中枢神経系における筋収縮・弛緩に伴う運動出力経路興奮性の調節部位を特定するために、実験 2 と同じ設定で、脊髄運動ニューロンプールの興奮性の指標である H (Hoffmann) 反射を記録した。その結果、主働筋であるヒラメ筋の H 反射が、同等筋活動量に対して、収縮期より弛緩期で減少したことから、筋弛緩期には、 α 運動ニューロンに単シナプス接続する Ia 求心性ニューロン終末がシナプス前抑制を受けていることが明らかとなった。

4. 実験 4 (第 5 章：筋収縮・弛緩期の拮抗筋運動経路の興奮性)

本実験では、実験 2 でみられた拮抗筋 (前脛骨筋) の皮質脊髄路興奮性が筋弛緩期に増大するという知見を、実験 2 で主働筋であったヒラメ筋を拮抗筋とする課題動作 (足関節背屈トルク増減課題) によって検証した。その結果、拮抗筋では、MEP、H 反射は筋弛緩期に明らかに増大した。このことは、主働筋と拮抗筋の運動ニューロンプールの興奮性が相反的一括制御を受けている可能性を示唆するものである。

5. 実験 5 (第 6 章：筋収縮・弛緩期の伸張反射応答)

本実験では、前記と同様の足底屈筋を主働筋とした漸進的トルク増減課題を行わせ、その遂行中に実際に足背屈外乱による筋伸張刺激を加えて伸張反射を誘発させた。伸張反射応答は、その潜時によって、短潜時反射 (SLR) と中潜時反射 (MLR) に大別されるが、特に SLR はヒラメ筋、腓腹筋とも、筋収縮期に比べて弛緩期に応答強度が減弱した。以上のことから、特に筋紡錘 Ia 線維由来の短潜時伸張反射は、筋弛緩期において収縮期に比べて低く抑えられていることが示された。

以上の実験結果は、運動の力学的出力であるトルク、それを生成する筋活動、さらにその活動を調節する脳・神経系の働きという一連の関係において、中枢神経系は、発揮トルクに対する筋活動量のヒステリシス (筋の電気生理学的・力学的ヒステリシス) と、筋活動量に対する運動経路興奮性のヒステリシス (神経性ヒステリシス) という階層的ヒステリシスを適切に実現するように運動指令を調節していることを示している。

本研究の結果は、筋の弛緩が、単純な“収縮の自然消滅”ではなく、“積極的な随意的抑制過程”であることを示唆している。このことは、スポーツなどの運動場面で経験的に指摘されている“脱力”や“リラックス”の重要性に関する科学的根拠を与えるものである。さらにまた、弛緩期に Ia 求心性ニューロンがシナプス前抑制を受けることによって伸張反射が抑制されるという反射制御メカニズムの存在は、筋弛緩初期の筋内直列弾性要素の解放に伴う筋紡錘伸張による伸張反射発現という、弛緩を阻害する筋活動の発現を抑え、円滑な筋の弛緩を促すという意味で、機能的に重要であると考えられる。

これらの成果はすべて申請者のオリジナルな発見であり、その発見事実は学術業績として極めて有意義であると認められる。よって、本審査委員会は、本論文は博士 (学術) の学位を授与するにふさわしいものと認定する。