

論文の内容の要旨

論文題目

Neural control mechanisms of the ankle extensor and flexor muscles during standing in humans

ヒト立位姿勢における足関節底・背屈筋の神経制御メカニズム

氏名 小幡 博基

はじめに (第1章)

ヒトの立位姿勢は、身体の高い場所に位置する重心を狭い足底面上で制御する必要があり不安定である。そのため、各関節まわり、特に足関節まわりでの適切な筋活動によるトルク発揮が不可欠である。通常、静止立位姿勢において、我々の体はわずかに前傾しており足関節底屈筋(ankle extensor, plantar-flexor)の持続的な活動によって姿勢が保持されている。一方、足関節背屈筋(ankle flexor, dorsi-flexor)に筋活動上の応答は認められない。しかしながら、このことは足関節背屈筋が立位姿勢の保持に無関係であることを示しているのだろうか？本研究では、立位姿勢における足関節底屈筋および背屈筋の両筋の神経制御メカニズムに注目し、それぞれの筋における伸張反射、皮質脊髄路、皮質内促通・抑制回路の興奮性が立位時および座位時においてどのように調節されているのかを、電気生理学的手法を用いて検討した。さらに、加齢により、これらの神経制御がどのような影響を受けるのかについても併せて検討した。本研究で行った5つの実験の概要は次のとおりである。

(1) 立位姿勢における足関節底・背屈筋の伸張反射応答 (第2章)

本実験では反射系の調節メカニズムを検討するために、健康成人10名を被検者として、立位時のヒラメ筋および前脛骨筋の伸張反射応答が、仰臥位時と比較してどのように調節されているのかを調べた。ヒラメ筋および前脛骨筋から表面筋電位(EMG)を導出した。仰臥位時のヒラメ筋背景筋活動を、随意収縮により立位時と同レベルに合わせて実験を行った。伸張反射応答を誘発

するために、3種類(設定値 100, 200, 300 degree/sec)の足関節背屈外乱(ヒラメ筋の伸張反射応答を誘発)および底屈外乱(前脛骨筋の伸張反射応答を誘発)をサーボモータにより与えた(振幅 10 degree). ヒラメ筋と前脛骨筋に誘発された伸張反射応答は、その潜時によって、短潜時反射(SLR), 中潜時反射(MLR), 長潜時反射(LLR)に分けて解析を行なった. その結果、ヒラメ筋および前脛骨筋の両方とも、立位時には座位時に比べて伸張反射応答が増大した. しかしながら、ヒラメ筋では伸張反射応答の増大が SLR と MLR に認められたのに対して、前脛骨筋では MLR と LLR に認められた. このことから、立位-座位姿勢間の伸張反射調節が、ヒラメ筋と前脛骨筋では異なった神経機序で行なわれていることが明らかになった.

(2) 立位姿勢における足関節底・背屈筋の皮質脊髄路の興奮性 (第3章)

本実験では、立位時のヒラメ筋および前脛骨筋の皮質脊髄路の興奮性がどのように調節されているのか、座位時と比較して調べた. ヒラメ筋および前脛骨筋から EMG を導出した. 座位時のヒラメ筋背景筋活動を、随意収縮により立位時と同レベルに合わせて実験を行った. 皮質脊髄路の興奮性は、頭部運動野上へ経頭蓋磁気刺激装置による磁気刺激を与えることで運動誘発電位を各筋から導出し、推定した. ヒラメ筋(n=10)および前脛骨筋(n=8)を支配する運動野の至適位置は個別に決定され、各筋への磁気刺激はそれぞれ別の日に行なわれた. 磁気刺激の強度を数段階設定し、刺激強度-運動誘発電位の入出力特性をシグモイド曲線回帰から得られる指標で評価した. その結果、ヒラメ筋と前脛骨筋の両筋とも立位時には座位時に比べ、シグモイド曲線の定常値(応答の最大値)および最大傾斜が有意に増大した. このことから、両筋の皮質脊髄路の興奮性調節が、立位時と座位時では異なった神経機序で行われており、中枢神経系が外乱に対応するため足関節の応答を高めていることが明らかになった.

(3) 立位姿勢における足関節底・背屈筋の皮質内促通・抑制性回路の興奮性 (第4章)

実験(2)でみられた足関節底・背屈筋の皮質脊髄路興奮性の増大が、中枢神経系のどのレベルで生じているのかを検討するために、本実験では運動野内促通・抑制性神経回路の興奮性が立位-座位間でどのように調節されているのか調べた(n=9). これらの回路の興奮性は、一つの磁気刺激コイルを用いて、二つの刺激(条件刺激と試験刺激)を様々な時間間隔(ISI)で与える二連発磁気刺激方を用いて評価した. 閾値下の経頭蓋磁気刺激を条件刺激として与え、その後 ISI=3ms または ISI=10ms で閾値上の経頭蓋磁気刺激を試験刺激として与えた. 先行研究により、条件刺激は ISI=3ms で試験刺激を抑制させ(SICI), ISI=10ms で試験刺激を促通させることが報告されている. その結果、前脛骨筋では座位時に比べて立位時に SICI が減少し、ICF が増大した. 一方、ヒラメ筋では SICI と ICF の両方とも立位-座位姿勢間の変化は認められなかった. このことから、少なくとも前脛骨筋に関しては、立位時の皮質脊髄路の興奮性増大に皮質内の促通および抑制性回路が関与していることが明らかになった.

(4) 立位姿勢における足関節底・背屈筋伸張反射応答の加齢の影響 (第5章)

実験(1)においてみられた姿勢変化による伸張反射の興奮性調節が加齢による影響を受けるのか否かを検討した。健常高齢者および健常成人を対象として、立位時のヒラメ筋(高齢者：n=10, 成人：n=12)および前脛骨筋(高齢者：n=14, 成人：n=14)の伸張反射応答が、座位時と比較してどのように調節されているのかを調べた。ヒラメ筋および前脛骨筋から表面筋電位(EMG)を導出した。座位時のヒラメ筋背景筋活動を、随意収縮により立位時と同レベルに合わせて実験を行った。伸張反射応答を誘発するために、3種類の速度(設定値 50, 150, 250 degree/sec)の足関節背屈外乱(ヒラメ筋の伸張反射応答を誘発)および底屈外乱(前脛骨筋の伸張反射応答を誘発)をサーボモータにより与えた(振幅 5 degree)。ヒラメ筋と前脛骨筋に誘発された伸張反射応答は、その潜時によって、短潜時反射(SLR), 中潜時反射(MLR), 長潜時反射(LLR)に分けて解析を行なった。その結果、健常成人で観察された座位時と比べた立位時のヒラメ筋(SLR)の増大および前脛骨筋(MLR, LLR)の伸張反射応答の増大が、健常高齢者では認められなかった。このことから、姿勢条件に依存した反射応答の調節能力が高齢者では低下することが明らかになった。

(5) 足関節底・背屈筋伸張応答の加齢の影響 (第6章)

実験(4)において、ヒラメ筋と前脛骨筋では加齢の影響を受ける反射成分が異なることが示されたが、本実験では各筋の筋活動レベルを変えた時にも同様の傾向が認められるのかを検討した。被検者は健常高齢者 20 名および健常成人 23 名であった。ヒラメ筋および前脛骨筋から EMG を導出した。座位姿勢において、ヒラメ筋または前脛骨筋の背景筋活動を 0%または 10%(ヒラメ筋または前脛骨筋の最大随意収縮時筋放電量を 100%とする)発揮した際に伸張反射応答を誘発した。伸張反射応答を誘発するために、3種類の速度(設定値 150, 250, 350 degree/sec)の足関節背屈外乱(ヒラメ筋の伸張反射応答を誘発)および底屈外乱(前脛骨筋の伸張反射応答を誘発)をサーボモータにより与えた(振幅 15 degree)。ヒラメ筋と前脛骨筋に誘発された伸張反射応答は、その潜時によって、SLR, MLR, LLR に分けて解析を行なった。その結果、ヒラメ筋伸張反射の加齢による影響は SLR の背景筋活動に依存した調節に認められたのに対し、前脛骨筋では背景筋活動に関係なく LLR の反射成分が高齢者では成人に比べ有意に増大した。このことから、筋によって加齢の影響を受ける伸張反射成分が異なることが明らかになった。

総括論議（第7章）

本研究では、ヒト立位姿勢における足関節底・背屈筋の神経制御メカニズムを調べるために、伸張反射応答、皮質脊髄路の興奮性、皮質内促通・抑制性回路の興奮が脊臥位・座位時と比較して立位時にどのように調節されているのか、電気生理学的手法を用いて検討してきた。その結果、足関節底屈と背屈筋の両方の筋で、立位時には仰臥位や座位時に比べて伸張反射の興奮性および皮質脊髄路の興奮性が増大していることが明らかになった。このことは、足関節底・背屈筋が立位時の外乱に対応するため筋の応答性を高めていることを示している。

本研究の結果、足関節背屈筋である前脛骨筋では、皮質脊髄路の興奮性増大の神経メカニズムとして少なくとも部分的には運動皮質内の促通・抑制性回路が関与していることが示された。さらに、立位時の前脛骨筋の伸張反射応答の増大は、皮質を介する経路だと報告されている LLR に主に認められた。これらのことを総合すると、通常立位姿勢時に筋活動の認められない前脛骨筋では、皮質レベルでの神経制御により筋の応答性を高めることで外乱に対応し、立位姿勢の安定性を図っていると考えられる。一方、足関節底屈筋であるヒラメ筋に関しては、伸張反射応答の増大が主に SLR に認められたことから、少なくとも本研究で用いた足関節軸の背屈方向の外乱に対しては、脊髄レベルで立位時の外乱に対応しているものと考えられる。さらにまた、高齢者における実験結果から、これらの足関節底・背屈筋間の神経制御メカニズムの違いは、それぞれの筋の加齢の特徴にも反映されることが示された。

本研究の結果より、ヒト立位姿勢において足関節底屈筋と背屈筋ではその神経制御メカニズムが異なることが明らかになった。