

歩行動作の立脚期における膝関節運動の力学的制御メカニズムの解明

徳永由太^{1),2)}、高林知也^{2),3)}、稲井卓真^{1),2)}、久保雅義^{2),3)}

- 1) 新潟医療福祉大学大学院 医療福祉学研究所
- 2) 新潟医療福祉大学 運動機能医科学研究所
- 3) 新潟医療福祉大学 理学療法学科

【背景・目的】歩行動作では膝関節運動が円滑に制御されることにより、接地直後の衝撃吸収や立脚期における体重支持といった重要な機能的役割を達成している。膝関節に要求される機能的役割を達成するためには歩行動作中に膝関節が適切な角度に制御される必要がある。歩行動作時の膝関節運動は、股・膝・足関節モーメントの協調的な作用によって達成されていると考えられている。しかし、股・膝・足関節モーメントがどのような力学的メカニズムによって膝関節運動を制御しているのかは明らかとなっていない。本研究では、ヒトの筋骨格系を数理モデル化した筋骨格モデルによるシミュレーションにより、歩行動作の立脚期における膝関節運動の力学的制御メカニズムを解明することを目的とした。

【方法】歩行動作のシミュレーションには NCSRR が無償で公開している健康成人 1 名（身長：1.8 m、体重：72.6 kg）の歩行動作データを使用した。なお、解析区画は立脚期と規定した。歩行時の膝関節角加速度に股・膝・足関節モーメントがどのように寄与しているのかを明らかにするために、Induced Acceleration 解析 (IAA) を実施した。IAA では身体の運動方程式に基づいて「身体に作用する力」と「その結果として生じる運動」の因果関係を明らかにすることができる。シミュレーションおよび IAA は OpenSim 3.3 (Delp et al. 2007) により実施した。

【結果】図 1 に歩行動作の立脚期において各関節モーメントが発生させた膝関節角加速度を示す。股関節モーメントは初期接地から立脚終期（0%～80%）にかけて膝関節を伸展方向へ加速していた。その後は膝関節を屈曲方向へ加速していた。膝関節モーメントは、初期接地から荷重応答期中盤（0%～10%）、立脚中期後半から遊脚前期中盤（40%～90%）、の 2 つの相で膝関節を屈曲方向へ加速しており、それ以外の相では膝関節を伸展方向に加速していた。足関節モーメントは初期接地から荷重応答期終了（0%～20%）までは膝関節を屈曲方向へ加速しており、それ以降は膝関節を伸展方向へ加速していた。

【考察】初期接地から荷重応答期終了まで（0～20%）の相では、膝関節は股関節モーメントによって伸展方向に、足関節モーメントによって屈曲方向に加速されており、膝

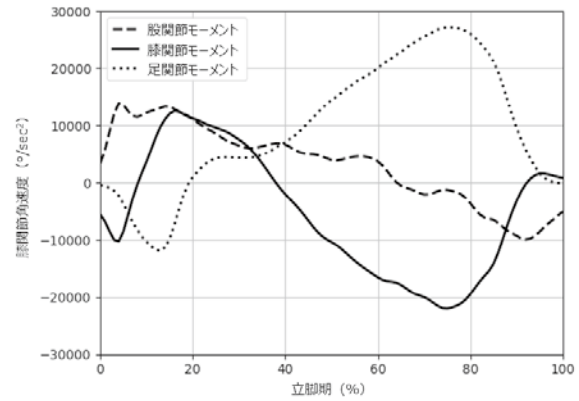


図 1. 各関節モーメントによる膝関節角加速度。縦軸の正值は伸展方向、負値は屈曲方向の角加速度を表している。

関節モーメントは股・足関節モーメントによる膝関節角速度を調整するように加速方向を切り替えていた。荷重応答期では、大腿四頭筋力の筋力低下や痙性麻痺によって膝折れや膝関節の過伸展が生じることが知られている。このような異常な膝関節運動を引き起こさないためにも膝関節モーメントによる調整が重要な役割を果たしていることが考えられた。

荷重応答期終了から立脚中期中盤まで（20～40%）の相では、股・膝・足関節モーメントが膝関節を伸展方向へ加速させていた。従来の考えでは、この相では大腿四頭筋の作用によって膝関節伸展運動が生じていると考えられていた。しかし、今回の解析により、この相の膝関節伸展運動は足・膝・股関節モーメントの共同作用によって生じていることが明らかとなった。

立脚中期後半から遊脚前期中盤まで（40～90%）の相では、膝関節は足関節モーメントによって伸展方向に、膝関節モーメントによって屈曲方向に加速されていた。これまでの検証では、この相で膝関節は伸展位を保持しているにも関わらず、膝関節屈曲モーメントが作用している理由は十分に説明されていなかった。本研究の結果から考えると、この相では、膝関節伸展運動は主として足関節モーメントで行われており、膝関節モーメントは足関節モーメントの膝関節伸展作用を緩和することで、過剰な膝関節伸展運動が生じないようにしていると考えられた。

【結論】本研究は下記の 3 点を明らかにした。

- 1) 初期接地から荷重応答期終了までは膝関節モーメントが膝関節を加速させる方向を切り替えることで制御されている。
- 2) 荷重応答期終了から立脚中期後半までは股・膝・足関節モーメントが共同して作用することで膝関節を伸展方向に加速させる。
- 3) 立脚中期後半から遊脚前期中盤までは足関節モーメントと膝関節モーメントの拮抗した作用によって膝関節が適切な位置に保たれる。