

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 川本 竜史

移動運動中の下肢骨には様々な負荷が作用するが、中でもヒト長骨は、「捻り」に対して最も脆弱であることが知られている。特に脛骨は、疲労骨折など慢性障害の頻発部位でもあることから、脛骨に作用する捻り負荷の定量的検討は、重要な研究課題であると考えられる。しかしながら現在まで、3次元の逆ダイナミクスを応用して、身体運動中の脛骨捻り負荷を非侵襲的に定量化した研究は存在しない。

本論文は、3次元逆ダイナミクスを応用した脛骨捻り負荷の非侵襲的な推定方法を提示し、その妥当性を検証した上で、多様な身体運動に伴う脛骨捻り負荷を横断的に検討し、脛骨捻り負荷の増大に関与する身体運動の特徴を解明するという研究課題を中心に展開された。また、走行を中心として、身体運動中の脛骨捻りモーメントの個人差についても検討がなされた。

身体運動中の脛骨捻りモーメントを推定するために、本論文ではまず3次元での逆ダイナミクスを用いて、脛骨両端に作用する長軸まわりの正味モーメントを計算した。続いて、脛骨長軸モーメントの準平衡を仮定し、その妥当性を検証した上で、脛骨捻りモーメントを決定した。また立位捻り動作に伴う脛骨捻りモーメントの作用様式は、対象動作の運動力学的な特徴(特にフリーモーメントの作用)を妥当に反映している上、その値(最大15Nm程度)は、先行研究によって報告されている脛骨破断強度(98Nm)を十分に下回っていた。更に、脛骨を円筒形でモデリングして求めた捻り応力(5.0MPa)は、先行研究で報告されている、実測に基づく歩行時の脛骨捻り応力(3.0MPa)と比較しても妥当であった。以上の結果から、本手法による脛骨捻りモーメントの定量化は、妥当であると考えられた。以下では同手法を応用して得られた成果を要約する。

膝屈曲に伴う下腿内傾や、内側方向への床反力の作用が大きい Knee-In スクワット時の脛骨近位部には、Neutral スクワット時よりも、最大で2.4倍大きい内旋モーメントが作用していた。この結果から、膝屈伸運動中の Knee-In は、脛骨に対する捻り負荷を増大させることが示唆された。また同速度(3.5m/s)での直線走と比較して、下腿外傾や外側方向への床反力が大きい急カーブ走(R=5m)の内側脛骨近位部には、直線走や緩カーブ走(R=15m)と比較して、1.5~1.7倍の大きな外旋モーメントが作用していた。下腿の内傾、及び内側方向への床反力が顕著であった最大努力でのジグザグ走では、脛骨近位部に、最大努力(7.2m/s)での直線走と比較して1.8倍大きい内旋モーメントが作用していた。以上の結果から、急カーブ走やジグザグ走のような急激な方向転換を伴う走行では、直線走と比較して、脛骨に作用する捻り負荷が増大することが定量的に示された。また運動学的、運動力学的比較の結果から、Knee-In スクワット、急カーブ走、及びジグザグ走で認められた脛骨捻りモーメントの増大には、共通して下腿の側方傾斜と床反力側方成分が、特に強く関与していると考えられた。

上記の推察をもとに、身体運動中の脛骨捻り負荷に関連する運動学的、運動力学的主要因を明らかにするため、多様な身体運動を通じて、横断的に脛骨捻りモーメントと下腿運動学、及び床反力との相関関係が検討された。この結果、脛骨捻りモーメントはピーク値、平均値とも、下腿の側方傾斜、及び床反力側方成分と有意な相関関係にあった（側方傾斜: $r > 0.82$ ($P < 0.0001$), 床反力: $r > 0.63$ ($P < 0.05$)。一方フリーモーメントと脛骨捻りモーメントのピーク値との間には、有意な相関は認められなかった。以上の結果から、身体運動中の脛骨捻り負荷に影響を及ぼす運動学的な主要因は下腿の側方傾斜であり、運動力学的な主要因は床反力の側方成分であることが確認された。

現在まで、身体運動形態と脛骨捻り負荷との関係の理解を促す定量的情報は、皆無であった。本研究結果は、両者の関係を定量的に示したはじめての成果であり、身体運動とそれに伴う脛骨捻り負荷との基礎的な関係を理解する上で、貴重な知見であると考えられた。また運動形態とスポーツ障害との疫学的関係を考察する上での、基礎情報ともなり得ると考えられた。更には、特定個人が行う走行を、脛骨捻り負荷の回避という観点から観察する上での手がかりとなることも期待された。

続いて、特に慢性障害との密接な関係が指摘されている走行を中心に、個人差に関する検討が行われた。中、高速度（3.5, 5.0m/s）での直線走行に関しては、脛骨捻りモーメントと下腿側方傾斜との間にもみ有意な相関関係 ($r > 0.80$, $P < 0.05$) が認められたことから、直線走行中の脛骨捻り負荷の個人差の主要因は、下腿の側方傾斜であることが示唆された。一方、方向転換走などの高強度運動では、床反力側方成分が、脛骨捻り負荷の個人差に関与していた。論文内では、これらの結果に基づき、脛骨捻り負荷に関する具体的な軽減策も提案されており、将来的な発展性が大いに期待された。

本研究の結果、身体運動中の脛骨捻り負荷に影響を及ぼす運動学的、運動力学的な主要因が明らかとなった。またこれらの主要因は、走行をはじめとする特定運動に伴う脛骨捻り負荷の個人差にも関連している可能性が示唆された。以上のような知見は、脛骨慢性障害に対する予防策の検討のみならず、脛骨に対する過負荷を回避しつつ、高い運動パフォーマンスを実現するための、科学的スキルの提案へとつながることが期待された。また本手法は、非侵襲的に脛骨に作用する捻り負荷を推定できるため、極めて汎用性が高く、多様な研究課題への応用が可能であると考えられた。より発展的には、臨床やスポーツ指導現場での実用化も大いに期待できた。

以上の論文に関する 1 編の原著論文は、申請者がファーストオーサーとしての公表が決定している。これらの内容について審査委員会で評価した結果、審査委員全員一致して、申請者論文は、博士(学術)の学位にふさわしいと結論した。