

学 位 論 文 題 名

Biomechanical analysis of rehabilitation
in the standing position

(立位姿勢におけるリハビリテーションに関する生体工学的研究)

学位論文内容の要旨

【緒言】膝関節に作用する力を解析することは、膝関節疾患の病態解明と治療法確立のために極めて重要である。これまで報告されている論文では関節面に作用する力のうち圧迫力 (compression force) の解析に重点がおかれており、剪断力 (shear force) については未知の問題が多く残されていた。しかし、近年の膝関節外科の進歩により、膝十字靱帯の再建が可能になったことに伴い、日常生活動作や筋力訓練中に膝関節に作用する剪断力を解明することが急務となった。特に立位あるいは荷重位という状態は日常生活動作あるいはリハビリテーションにおいて避けられない力学的環境であり、この姿勢における剪断力の解明はきわめて重要である。本論文の目的は両膝を屈曲し、両脚に均等に荷重した立位姿勢において、脛骨が受ける力と膝屈曲角の関係およびそれが上体の姿勢変化により及ぼされる効果について解析することである。

【実験方法】健康成人男子21名(19-22才、平均 21.5才)を被験者とし左下肢について計測を行った。方法論は Yasuda and Sasakiの筋電図学的手法を用いた二次元力学モデル解析に準じた。実験は3つの課程からなる。第一の課程では、筋トルクと表面筋電図の積分値とが比例関係にあるという原則を検証し、これにより筋張力を推定するための実験を行った。この計測のために大腿四頭筋および膝屈筋群の筋トルク測定装置を作製した。装置は側臥位とした被験者の体幹および大腿を固定し、膝関節の伸展、屈曲を行った際の筋トルクを測定するものである。電極は双極の表面電極を用い、内側広筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋の長頭(以下、外側膝屈筋群と略す)、半膜様筋と半腱様筋(以下、内側膝屈筋群と略す)の筋腹中央に貼付し、固定した。この時の膝屈曲角度は電気角度計を用いて計測し、同時に記録した。膝屈曲位で大腿四頭筋と膝屈筋群の単独等尺性収縮を行わせ、膝屈曲角は 15° 、 30° 、 60° 、 90° の順で行わせた。また、上体の姿勢変化による影響をみるために体幹の屈曲角(装置の長軸と体幹軸のなす角)も各膝屈曲角ごとに 0° 、 15° 、 30° 、 60° 、 90° の順序で5通りに変化させた。筋トルクは被験者の眼前におかれた oscillo-scope に beam で表示され、被験者はこれを見ながら一定筋トルクをすみやかに発生させて3秒間維持し、これを $1.8\text{kg}\cdot\text{m}$ ずつ増やすように命じた。この時の筋電図、積分筋電図および筋トルクが記録された。第二の課程では被験

者に一定の角度で膝を屈曲させた立位姿勢で約5秒間静止させ、その時の筋電図および積分筋電図を記録した。膝屈曲角、体幹の屈曲角（鉛直線と体幹のなす角）および電極の貼付状態は第一の課程と同様とした。またこの際、左下肢の側面X線写真を撮影した。第1・第2の実験を通して電極および電気角度計の装着状態が変わらぬように配慮し、同一感度で記録した。またすべての筋収縮の前には十分な休息を与え、疲労感のない状態で筋収縮を行わせた。第三の課程では第一の課程において撮影した左下肢側面X線写真を基に、膝屈曲立位における下肢矢状面モデルおよび側臥位の大腿四頭筋、膝屈筋群等尺性筋収縮時の筋張力における下肢矢状面モデルを設定した。その中で脛骨関節面上端に作用する力を剪断力（ F_s ）と定義し、第1・第2の課程で得られた筋電図学的データおよび脛骨に作用する外力の均衡に関する仮定より、これを算出した。

【結果】膝屈曲立位においては、すべての被験者で膝屈曲角度や体幹屈曲角にかかわらず内側広筋、大腿直筋、外側広筋、外側膝屈筋群、内側膝屈筋群の全筋に筋電活動が認められた。それらの筋電図の振幅は膝の屈曲角の増大とともに増加する傾向が認められた。体幹の姿勢変化による各筋の筋電活動の変化をみると、体幹直立位と較べて体幹を前屈させるほど外側膝屈筋群、内側膝屈筋群の筋電図の振幅が増大した。この傾向は膝屈曲 15° 、 30° 、 60° において顕著であった。

全被験者における剪断力(F_s)の平均値は、体幹および膝屈曲角度にかかわらず体重の7～125%に相当する大きさの負の値をとり脛骨に対する後方引出し力の存在を示した。体幹屈曲角が一定のときの F_s の平均値は、膝屈曲角が大きいほど大きな後方引出し力を示す傾向を認めた。一方、一定の膝屈曲角度における体幹屈曲角の影響についてみると、特に膝屈曲 30° 、 60° において、 F_s の平均値は体幹の屈曲角が増加するほど統計学的に有意差をもって大きな後方引出し力を示した。しかし、計測した各肢位における F_s の標準偏差は $0.07w \sim 0.58w$ (w = body weight)であり各データ間にはばらつきが存在した。実際に体幹 0° 、膝屈曲 30° では F_s 値が正の値をとる被験者が3例(14.3%)に存在した。したがって、安全域の統計学的検討を行った。本研究の測定結果を標本分布と仮定し、母集団において剪断力(F_s)が後方引出し力となる被験者の存在する百分率を正規分布理論を用いて算出した。その結果、体幹前屈 30° 、膝屈曲 30° 以上の各肢位では、母集団の90%以上の被験者において負の値の剪断力すなわち後方引出し力が作用していると推定された。

【考察】膝屈曲両脚立位姿勢においては大腿四頭筋と膝屈筋群の同時収縮が生じており、しかも体幹の前屈により膝屈筋群の筋活動は増大することが筋電図学的に明らかになった。この現象は2関節筋である膝屈筋群の収縮が上体の姿勢の保持、特に骨盤の前傾位を保持するために必要となるためと考えられた。体幹を前屈すると体幹の重心へのmoment armは増大し、

その姿勢を維持するために膝屈筋群の張力が増加する。今回行った解析結果では、大腿-脛骨関節における剪断力の平均値はすべて後方引出し力を示した。また体幹を前屈することにより剪断力は後方引出し力として有意に増大した。これは上述の膝屈筋群の作用が影響しているものと考えられた。靱帯再建術後のリハビリテーションへの本訓練の臨床応用を考慮した場合、体幹を前屈するという極めて簡単な動作によって後方引き出し力が増大するという現象は極めて注目すべき現象である。リハビリテーションの見地からこの現象を定量的に示した報告はなく、その意味において本研究は重要である。

本研究結果から体幹を前屈させた膝屈曲立位姿勢による訓練が膝前十字靱帯（ACL）再建術後早期から行える可能性が示唆された。従来、荷重は後期になってから行われており、術後早期には禁じられていた。術後早期から荷重位で訓練が可能となれば、持久力を中心とした筋力強化、proprioceptive function の訓練、骨萎縮の予防等様々な面で良い効果が期待される。また、実際にACL再建術後の筋力訓練として臨床応用する場合、再建靱帯に対する安全性を考慮しなければならない。安全域の統計学的検討の結果、体幹前屈 30° 、膝屈曲 30° 以上の各肢位では母集団の90%以上の被験者において後方引出し力が作用していると推定された。臨床応用に際してはこの結果を踏まえて、膝および体幹の屈曲角を制御した訓練を処方すべきと考えられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志

副 査 教 授 加 藤 正 道

副 査 教 授 寺 沢 浩 一

学位論文題名

Biomechanical analysis of rehabilitation in the standing position
(立位姿勢におけるリハビリテーションに関する生体工学的研究)

【緒言】膝関節に作用する力を解析することは、膝関節疾患の病態解明と治療法確立のために極めて重要である。近年の膝関節外科の進歩により、膝十字靱帯の再建が可能になったことに伴い、日常生活動作や筋力訓練中に膝関節に作用する剪断力を解明することが急務となった。特に立位あるいは荷重位という状態は日常生活動作あるいはリハビリテーションにおいて避けられない力学的環境であり、この姿勢における剪弾力の解明はきわめて重要である。本論文の目的は両膝を屈曲し、両脚に均等に荷重した立位姿勢において、脛骨が受ける力と膝屈曲角の関係およびそれが上体の姿勢変化により及ぼされる効果について解析することである。

【実験方法】健康成人男子21名(19-22才、平均21.5才)を被験者とし左下肢について計測を行った。方法論は筋電図学的手法を用いた二次元力学モデル解析である。実験は3つの課程からなる。第一の課程では、筋トルクと表面筋電図の積分値とが比例関係にあるという原則を検証し、これにより筋張力を推定するための実験を行った。この計測のために大腿四頭筋および膝屈筋群の筋トルク測定装置を作製した。装置は側臥位とした被験者の膝関節の伸展、屈曲を行った際の筋トルクを測定するものである。電極は双極の表面電極を用い、内側広筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋の長頭、半膜様筋と半腱様筋の筋腹中央に貼付し、固定した。この時の膝屈曲角度は電気角度計を用いて計測し、同時に記録した。膝屈曲位で大腿四頭筋と膝屈筋群の単独等尺性収縮を行わせ、膝屈曲角は15°、30°、60°、90°の順で行わせた。また、上体の姿勢変化による影響をみるために体幹の屈曲角も各膝屈曲角ごとに0°、15°、30°、

60°、90°の順序で5通りに変化させた。この時の筋電図、積分筋電図および筋トルクが記録された。第二の課程では被験者に一定の角度で膝を屈曲させた立位姿勢で約5秒間静止させ、その時の筋電図および積分筋電図を記録した。膝屈曲角、体幹の屈曲角および電極の貼付状態は第一の課程と同様とした。またこの際、左下肢の側面X線写真を撮影した。第1・第2の実験を通して電極および電気角度計の装着状態が変わらぬように配慮し、同一感度で記録した。第三の課程では第一の課程において撮影した左下肢側面X線写真を基に、膝屈曲立位における下肢矢状面モデルおよび側臥位の大腿四頭筋、膝屈筋群等尺性筋収縮時の筋張力における下肢矢状面モデルを設定した。その中で脛骨関節面上端に作用する力を剪断力(F_s)と定義し、第1・第2の課程で得られた筋電図学的データおよび脛骨に作用する外力の均衡に関する仮定より、これを算出した。

【結果】膝屈曲立位においては、すべての被験者で膝屈曲角度や体幹屈曲角にかかわらず大腿四頭筋および膝屈筋群の全筋に筋電活動が認められた。それらの筋電図の振幅は膝の屈曲角の増大とともに増加する傾向が認められた。体幹の姿勢変化による各筋の筋電活動の変化をみると、体幹直立位と較べて体幹を前屈させるほど外側膝屈筋群、内側膝屈筋群の筋電図の振幅が増大した。全被験者における剪断力(F_s)の平均値は、体幹および膝屈曲角度にかかわらず体重の7~125%に相当する大きさの負の値をとり、脛骨に対する後方引出し力の存在を示した。体幹屈曲角が一定のときの F_s の平均値は、膝屈曲角が大きいほど大きな後方引出し力を示す傾向を認めた。一方、一定の膝屈曲角度における体幹屈曲角の影響についてみると、特に膝屈曲30°、60°において、 F_s の平均値は体幹の屈曲角が増加するほど統計学的に有意差をもって大きな後方引出し力を示した。

【考察】膝屈曲両脚立位姿勢においては大腿四頭筋と膝屈筋群の同時収縮が生じており、しかも体幹の前屈により膝屈筋群の筋活動は増大することが筋電図学的に明らかになった。この現象は2関節筋である膝屈筋群の収縮が上体の姿勢の保持、特に骨盤の前傾位を保持するために必要となるためと考えられた。今回行った解析結果では、大腿-脛骨関節における剪断力の平均値はすべて後方引出し力を示した。また体幹を前屈することにより剪断力は後方引出し力として有意に増大した。これは上述の膝屈筋群の作用が影響しているものと考えられた。靱帯再建術後のリハビリテーションへの本訓練の臨床応用を考慮した場合、体幹を前屈するという極めて簡単な動作によって後方引き出し力が増大するという現象は極めて注目すべき現象である。

本研究結果から体幹を前屈させた膝屈曲立位姿勢による訓練が膝前十字靱帯(ACL)再建術後早期から行える可能性が示唆された。従来、荷重は後期になってから行われており、術後早期には禁じられていた。術後早期から荷重位での訓練が可能となれば、筋力強化等様々な面で良い効果が期待される。臨床応用に際しては本研究結

果を踏まえて、膝および体幹の屈曲角を制御した訓練を処方すべきと考えられた。

本研究は、立位姿勢という日常生活動作あるいはリハビリテーションにおいて避けられない力学的環境における膝関節に作用する剪断力について明らかにしたものであり、博士の学位に値するものと認定された。