

医学博士 黒沢秀樹

学位論文題名

膝十字靱帯のバイオメカニクス的研究

学位論文内容の要旨

I 研究目的

膝関節は大きな可動域と体重の数倍に及ぶ大きな負荷にも耐え得る巧妙な機能を持つ6自由度の運動系である。膝関節構成体の重度損傷によってその安定性や可動域が失われることは臨床的には今世紀初頭より認識されており、特に前十字靱帯（ACL）は臨床的機能障害の結果より膝関節の運動と安定性に関して最も重要な構成体のひとつと考えられた。解剖学的観察などより両十字靱帯の各線維群における機能の相違も指摘されてきたが、これらの定量的検討はされていない。本研究の目的は ACL および PCL の各線維束における膝関節運動に伴う長さ変化を定量的に同時計測し、それらの機能を解析評価することである。さらに膝関節屈伸運動における関節内および関節外再建 ACL の長さ変化についても計測し等尺性の観点から検討を行なった。

II 実験方法

計測に使用したトランスデューサは、外径1mm、内径0.65mmのシリコンチューブに導電体である Galium・Indium 合金を封入して作製されたものである。測定原理は、チューブの伸びによる抵抗変化を電気的に計測するもので、このデータをパーソナルコンピュータで処理・記録し、それを再び長さ変化として換算した。このトランスデューサの伸び剛性は 0.02N/mm と極めて小さく、靱帯伸び機能に対する影響は無視できると考えられる。十字靱帯の長さ変化計測実験には、凍結新鮮屍体3膝を室温にて解凍し、実験に供した。本実験では ACL 線維を前内側、前外側、後内側、および後外側の4線維束に、後十字靱帯（PCL）線維を大腿骨付着部で前方、中央、および後方の3線維束に分類し、トランスデューサは各線維束の中央を通るようにした。脛骨は実験机上の固定台に2本の Steinmann pin で固定し、不動とした。大腿骨を徒手的に動かして膝関節単純屈伸運動を行なった。次いで、大腿四頭筋筋力として膝蓋骨近位端に $10\text{N} \sim 80\text{N}$ の負荷を与え、屈曲 10° より 10 回膝関節屈伸運動を行なった。最後に、ACL を切除した膝に対し、同様の実験を行った。次いで、関節外 ACL 再建靱帯に関する実験では6膝関節を使用し、大腿骨

外側に5ヵ所、および脛骨のGerdy結節周囲に3ヵ所の靭帯錨着骨孔位置を設定した。関節内に関する実験に1膝を使用し、10通りの再建方法を設定した。

III 結 果

大腿四頭筋に張力を与えない膝関節単純屈伸運動において、ACL中の全トランスデューサは、屈曲30°付近までは屈曲と共に次第に短くなつたが、ここでは後方線維は前方線維に比較して約2倍の長さ変化を示した。その後、屈曲と共に前方線維は長くなり続けるが、後方線維はほぼ同じ長さを維持し続けた。PCLにおいては前方線維は屈曲約50°までほぼ直線的に長くなり、その後次第に短くなつてた。一方、後方線維は屈曲約70°までほぼ直線的に短くなり、その後は同様の長さを維持し続けた。中央の線維の長さ変化は他の線維束と比較して少なく、前方線維と後方線維の中間の長さ変化であった。大腿四頭筋に張力を与えた場合、ACLおよびPCLの線維群は力の大きさに対応して長さ変化を示したが、屈曲90°を越えるとACLの後内側線維束を除いた他の線維束の長さ変化は大腿四頭筋筋力の影響が少なくなった。ACLを切除した膝関節では、PCLの各線維束は屈曲60°までは大腿四頭筋筋力の影響を大きく受けるが、それ以降影響は小さくなつた。関節外再建ACLの錨着骨孔間距離の変化に関しては、どの組み合わせにおいても、膝関節の屈曲と共に大きくなる傾向にあった。再建靭帯の等尺性という観点からは、関節内再建における「ACLの脛骨付着部中央」と「大腿骨付着部近位後方」の組み合わせが今回の再建靭帯錨着位置間距離変化測定の結果の中で最も良好であった。

IV 考 察

膝関節は骨・軟骨・関節包のほか、靭帯、筋腱などより構成されており、両十字靭帯は膝関節の前後方向の安定性に強く関与している。外傷による十字靭帯損傷、あるいはその結果としての十字靭帶不全に起因する機能障害は近年大きな関心の対象となっており、特に、最近ではACL損傷に対して積極的に手術治療が行なわれている。今回の実験でも大腿四頭筋筋力とACLとは拮抗し、ACLを切除すると大腿四頭筋筋力による影響をPCLは強く受け、膝関節に不安定性が強く示された。今回のACLおよびPCLの長さ変化の実験結果より、ACLは前方の線維群と後方の線維群に分けられ、またPCLは前方、中央、及び後方の線維群に分けられ、機能の分担が示された。この両十字靭帯の機能は靭帯線維が緊張の弛緩の相互作用で行なう膝関節運動の誘導機構の存在を示す。さらに膝関節運動に伴い、靭帯線維に生理的な緊張と弛緩が連続的に作用することが、靭帯組織の恒常性維持にも欠かせないことも推定された。今回の実験結果では、等尺

性という観点から考えても関節外再建術は関節内再建術より劣ることが示された。現在行なわれている ACL 再建術でも再建靭帯の等尺性に力点が強く置かれているが、膝関節運動の誘導機構としての ACL を理解し再建靭帯にこの機能が付与されない限り、その他の膝関節構成体への再建靭帯に起因する長期的影響は避けられないと考えられる。ACL 再建の成績不良例の原因論の研究はまだ報告されておらず、今回の基礎的研究結果と今後の臨床成績研究との比較は興味深い。

V 結 語

新鮮屍体膝の十字靭帯を合計 7 つの線維束に訳、膝関節運動に伴う線維束内各トランスデューサの長さ変化を同時計測し、さらに ACL 再建における再建靭帯の骨錨着骨孔位置間距離変化についても計測した。長さ変化測定の結果、十字靭帯線維束はそれぞれが機能を分担していることが理解された。ACL 再建術において、関節内再建は関節外再建と比較して、等尺性という観点からは優れていたが、十字靭帯の膝関節運動を誘導するという機能にも十分配慮を払うべきであると推察された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志
副 査 教 授 阿 部 和 厚
副 査 教 授 田 邊 達 三

膝関節は、構成体の重度損傷によりその安定性や可動域が失われることは臨床的には今世紀初頭より認識されていた。特に前十字靭帯（ACL）は臨床的機能障害の結果より膝関節の運動と安定性に関しても最も重要な構成体のひとつと考えられた。両十字靭帯の各線維群における機能の相違も指摘されてきたが、この量的検討はされていない。本研究の目的は ACL および PCL の各線維束における膝関節運動に伴う長さ変化を定量的に同時測定し、それらの機能を解析評価することである。さらに関節内および関節外再建 ACL の長さ変化についても計測し、等尺性の観点から検討を行なった。

実験方法：計測に使用したトランスデューサは、シリコンチューブに導電体である Galium · Indium 合金を封入して作成されたものである。測定原理は、チューブの伸びによる抵抗変化を

電気的に計測するもので、このデータをパーソナルコンピュータで処理・記録し、それを再び長さ変化として換算した。このトランスデューサの伸び剛性は $0.02\text{N}/\text{mm}$ と極めて小さく、靭帯及び機能に対する影響は無視できると考えられる。十字靭帶の長さ変化計測実験には、凍結新鮮屍体膝を室温にて解凍し、実験に供した。本実験では ACL 線維を前内側、前外側、後内側、および後外側の 4 線維束に、後十字靭帶 (PCL) 線維を大腿骨付着部で前方、中央、および後方の 3 線維束に分類し、トランスデューサは各線維束の中央を通るように設置した。脛骨は実験机上の固定台に 2 本の Steinmann pin で固定し、不動とした。大腿骨を徒手的に動かして膝関節単純屈伸運動を行なった。次いで、大腿四頭筋筋力として膝蓋骨近位端に $10\text{N} \sim 80\text{N}$ の負荷を与え、膝関節屈伸運動を行なった。最後に、ACL を切除した膝に対し、同様の実験を行なった。次いで、関節外 ACL 再建靭帶に関する実験では、大腿骨外側に 5 ヶ所、および経骨の Gerdy 結節周囲に 3 ヶ所の靭帶錨着骨孔位置を設定した。関節内に関する実験では、10通りの再建方法を設定した。

結果および考察：膝関節単純屈折運動において、ACL 中の全トランスデューサは、屈曲 30° 附近までは屈曲と共に次第に短くなったが、ここでは後方線維は前方線維に比較して約 2 倍の長さ変化を示した。その後、屈曲と共に前方線維は長くなり続けたが、後方線維はほぼ同じ長さを維持した。これより ACL は機能的に前方の線維群と後方の線維群に分けることが可能と考えられた。PCL においては前方線維は屈曲約 50° までほぼ直線的に長くなり、その後次第に短くなっていた。一方、後方線維は屈曲約 70° までほぼ直線的に短くなり、その後は同様の長さを維持し続けた。中央の線維の長さ変化は比較的少なく、前方線維と後方線維の中間の長さ変化であった。大腿四頭筋に張力を与えた場合、ACL は大腿四頭筋筋力と拮抗することが示された。しかし、屈曲 90° を越えると ACL 線維束の長さ変化に対するは大腿四頭筋筋力の影響が少なくなった。ACL を切除した膝関節では、PCL の各線維束は屈曲 60° までは大腿四頭筋筋力の影響を大きく受け、膝関節の不安定性が示された。関節外再建 ACL の錨着骨孔間距離の変化に関しては、どの組み合わせにおいても、膝関節の屈曲と共に大きくなる傾向にあった。ACL 再建靭帶と等尺性という観点からは、関節内再建は関節外再建より優れていた。