

膝関節固有感覚を定量的に評価する手法の考案
～プロトタイプ案による膝前十字靱帯再建者と健常者の比較～

スポーツ医科学研究領域
5010A079-7 干場 拓真

研究指導教員 福林 徹 教授

【緒言】ヒトは筋や腱、関節からの固有感覚情報を利用して空間的身体位置を正確に把握することができる。しかし、前十字靱帯（以下ACL）損傷・再建などにより、ACLに存在していた固有感覚受容器を喪失してしまうと、求心性入力に変化をもたらし、その結果正確な運動感覚の知覚を困難にするものと予想されている。関節位置覚の欠如は、再受傷を含めた新たな二次障害の発現の一因として挙げられているが、ACL損傷や再建と膝関節位置覚、また運動パフォーマンスとの関連性を明確に示しているものは少ない。加えてこれまで、再建後のリハビリテーションを通じて感覚機能に対する効果は明らかとされておらず、その回復過程における阻害要因もわかっていない。

末梢からの正確な固有感覚をフィードバックするためには固有感覚受容器からの求心性入力が不可欠であり、ACLからの固有感覚情報が膝関節運動の知覚及び制御に関与していると考えられている。以上のことから二次障害の予防的観点からみて、ACL損傷・再建によって左右の膝関節の解剖学的特性や固有感覚が左右非対称となった者の膝関節固有感覚を定量的に評価する必要があると考えている。

【目的】

本研究では健常者にみられる運動制御の特性を科学的基盤とした膝関節固有感覚機能を簡便かつ定量的に評価する方法を考案することを目的とし、ACL再建術適用者の関節位置覚の識別能を3つの方法で多面的に検査した。1つ目は、従来の関節角度再現法を用いた。2つ目は、左右の脚を対象としたマッチング法（Position matching）を使用した。3つ目は、関節位置調節課題を用いて関節位置覚の継時的変動を測定した。さらに、膝関節伸展筋力を測定し、各方法で測定された関節位置覚の識別能との関連を探るとともにACLと膝関節固有感覚との関連について検証した。

【方法】前十字靱帯再建術後半年から一年以内の者7名（男性2名、女性5名）、膝関節疾患および外傷の既往歴のない健常者10名（男性4名、女性6名）を対象とした。ACL再建者に関する選定条件としては、競技歴を問わず損傷時に前十字靱帯以外に大きな損傷を負っていないこと、術後の回復が順調で患部に炎症や腫れがないこと、膝関節機能に異常がなく運動や日常生活に制限がないこととした。

膝関節位置覚評価にあたり、両脚の膝関節角度を電磁ゴニオメータ（Biometrics社製、2軸ゴニオメータ）から記録した。また、双極表面電極を両脚の前脛骨筋（Tibial Anterior: TA）、大腿直筋（Rectus Femoris: RF）、外側広筋（Vastus Lateralis: VL）に貼付し、筋活動電位測定（Bagnoli-8, EMG System, DELSYS社製）から課題動作の再現性を確認した。すべての測定信号はサンプリング周波数200 HzでAD変換器（PowerLab/16sp, ADInstruments社製）を介しコンピュータに保存した。

被験者は両脚が地面に接地しない状態で実験用椅子に座し、膝関節伸展による下腿の位置覚測定と一定の角度を保持する位置調節測定を行った。膝関節伸展に関して本実験では、座位の姿勢を開始角度0°（膝関節角度90°）とし、そこから伸展方向へ15°と30°を設定角度とした。位置覚測定については、3つの課題を行った。片脚のみで行う関節角度再現法（Repositioning of angle: RP）および両脚で行うマッチング法（Position Matching: PM）を用いた。加えて、本研究では1kg、2kgの負荷を基準脚に与える荷重負荷条件を実施した。位置調節測定では、片脚のみで一定角度の保持を行う課題（Position Task: PT）とした。測定中は視覚情報遮断のため常時アイマスクを着用した。統計検定にはすべての課題において二元配置分散分析を用い、下位検定にはStudentのT検定を用いた。

【結果】RP 課題では、対象脚、設定角度に関わらず健常群、ACL 再建群ともに同様な傾向を示した。一方 PM 課題において健常群では、基準脚を右と左にした場合、ほぼ同程度の誤差が確認されたが、ACL 再建群では、患側脚を基準脚として健側脚を合わせる条件で著しい誤差が生じるなど基準脚によって観察された誤差間に有意な差がみられた。また、基準脚に与えた荷重負荷は、両群で観察されたマッチング誤差に有意な影響を及ぼさなかった。PT 課題では、健常群では対象脚によって結果が変化することはなかった。一方で ACL 再建群では健側では時間の経過と共に角度の過大傾向がみられたが、患側では過小評価がみられ、後半 10 秒に有意な健・患側差がみられた。患側では、前半 10 秒と後半 10 秒、中盤 10 秒と後半 10 秒に有意に角度の過小評価が確認された。膝屈伸筋力では、伸展筋力角速度 60°時の最大値、屈曲筋力角速度 60°と 180°時の膝関節角度 30°（屈曲角度 60°）に観察された筋力に有意な差が認められた。しかし、PM 課題（基準脚：患側、負荷：0kg）と PT 課題（対象脚：患側、区間：後半 10 秒）で観察された誤差といずれの筋力との間に、有意な相関がみられなかった。

【考察】先行研究にて報告されているように、本研究においても ACL 再建が RP 課題で評価される関節位置覚に影響を及ぼすことはなかった。この結果は、たとえ ACL を損傷・再建した脚であっても膝関節角度を知覚する精度は健常脚と変わらずに維持されていることを示唆している。それにも関わらず、PM 課題において測定された膝関節位置覚は基準脚によって顕著に異なった。患側脚と健側脚の位置覚誤差の程度は常に一定ではなく、基準脚をどちらに定めるかによって誤差が変化した。ACL 損傷・再建が単に患側脚の位置覚決定プロセスに一定の角度誤差を引き起こすバイアスがかかることで説明されるならば、位置覚誤差の程度は基準脚に関わらず常に一定に維持されるはずである。この考えに一致しない今回の実験結果は、左右脚の位置を比較することで PM 課題を行う場合、単にそれぞれの脚の位置が独立して知覚されているのではなく、左右の比較プロセスを経て決定されている可能性を示唆し

ている。もしそうであれば、ACL 損傷・再建は片側に起こったとしても両側の位置覚決定プロセスに影響を及ぼし得るのかもしれない。

PM 課題において基準脚に過重負荷(1kgと2kg)をかける条件を検討したが、これは ACL 損傷の有無に関わらず膝関節位置覚に大きな影響を引き起こさなかった。これは、健常者を用いた先行研究でも同様の結果が報告されており、過重負荷によって引き起こされる膝伸展筋群や腱、関節の求心性感覚情報が膝位置覚に変化を惹起するに足るものではなかったと考えられる。これは、基準脚が患側であった場合も例外ではなく、たとえ ACL に損傷を受けていたとしても再建術を受けて半年以上経過している状態では、比較的弱い過重負荷であれば十分に補償することが可能であることを示している。PT 課題においては、対象脚を患側脚とした時、時間の経過と共に角度変位が大きくなった。これより、角度の調節過程において位置とその筋活動の知覚が正確に統合されておらず、少なからず患側脚においては持続的な求心性入力の変化が運動の出力に影響を与えていたのではないかと推測できる。

筋力では、本実験で対象とした ACL 再建者は、実際に膝伸展筋力は 60deg/sec(最大値)時に $-17.1 \pm 14.6\%$ 、膝屈曲筋力では 60deg/sec(30°)時に $-17.5 \pm 14.0\%$ 、180deg/sec(30°)には、 $-14.4 \pm 9.2\%$ の有意な筋力の健・患差が確認されている。しかし、本研究では健・患側脚の筋力差と位置覚と位置調節誤差にそれぞれ有意な相関関係が認められず、今回の結果を ACL 再建に伴う筋力低下と結論付けることは出来ないが、筋が固有感覚に大きく貢献していることは確かである。

【結論】これまで、ACL の膝関節固有感覚に対する貢献度、そして ACL 損傷・再建によって関節由来の固有感覚にどのような影響が及ぶかは明らかにされていなかった。しかし、本研究の結果は、ACL に存在する機械受容器からの求心性感覚情報が膝関節の位置覚認識に重要な役割を担っていることを示唆している。また、本研究で考案した評価方法は、膝関節固有感覚を簡便かつ定量的に捉えられる可能性がある。