

論文の内容の要旨

論文題目 膝前十字靭帯損傷に伴う大腿四頭筋筋力低下のメカニズム

氏名 小西 優

膝前十字靭帯断裂後の大腿四頭筋の筋機能低下は残存し、たとえ再建術を受け、筋機能の改善のためのリハビリテーションを行ったとしても受傷前の状態に完全に復帰させることは困難であるといわれている。このリハビリテーションの難しさの一因として、筋萎縮以外の筋機能の低下の原因が未だ明らかになっていないことが挙げられる。そこで本研究では、膝前十字靭帯損傷時に生ずる大腿四頭筋の最大筋力の低下は、筋萎縮以外にガンマループの機能低下の存在によること。この機能低下は膝前十字靭帯内のメカノレセプターの機能不全に起因することという2つの仮説を設けた。これを明らかにすべく以下、第二章から第五章の4つの研究をおこなった。各章の研究において、大腿四頭筋の筋力は、ASICS社製 Myolet RZ-450 を用い、膝 90 度屈曲位における最大等尺性筋力を測定し、そのときの外側広筋(VL)、内側広筋(VM)、大腿直筋(RF)からの筋放電を MEGA 社製 MP3000P を用いて導出した。

第二章の研究では、局所麻酔剤を用い膝関節からの求心性インパルスを阻害し、最大筋力発揮中の大腿四頭筋のアルファ運動ニューロンの活動性を見た。第二章は、二つの実験により構成されている。実験1では健常者の膝関節、その結果、実験1では、健常者の麻酔後の最大筋力(229±35Nm)と筋放電量(VL:0.26±0.22, VM:0.30±0.28, RF: 0.19±0.12)は、麻酔前の最大筋力(251±29Nm)と筋放電量(VL:0.29±0.23, VM:0.35±0.31, RF:0.24±0.14)に比べ有意に低下した。このことから、膝関節内にあるメカノレセプターからのフィードバ

ックの障害が、最大筋力発揮中の健常者の大腿四頭筋に分布するアルファ運動ニューロンの活動レベルを低下させると考えられた。これに対して、実験 2 では、膝前十字靭帯断裂患者にたいして、健常者と同量の局所麻酔剤を注入したにも関わらず、麻酔後の最大筋力(164±55Nm)と筋放電量(VL:0.12±0.07, VM:0.13±0.10, RF:0.09±0.05)は、麻酔前の最大筋力(167±49Nm)と筋放電量(VL:0.11±0.06, VM:0.13±0.10, RF: 0.09±0.04)に比べ低下しなかった。実験 2 の結果を実験 1 の結果と合わせて考えると膝前十字靭帯にあるメカノレセプターからの求心性フィードバックが、大腿四頭筋のアルファ運動ニューロンの最大賦活に貢献していることが推測できる。しかし、関節内のメカノレセプターからのフィードバックが、直接大腿四頭筋のアルファ運動ニューロンの活動に影響を与えることは稀であると考えられていることから、健常者の最大筋力と大腿四頭筋の筋放電量の有意な低下は、その他の介在するメカニズムが存在すると考えられる。

そこで、第三章の研究では、健常者群、膝前十字靭帯断裂群、膝前十字靭帯再建群、麻酔剤注入群(局所麻酔剤注入を行った健常者)の 4 群に対して大腿四頭筋でのガンマループの機能異常の存在を比較検証するために 50Hz の振動刺激を 20 分間膝蓋腱に与え、振動刺激による最大筋力と筋放電量の変化率((振動後の値 - 振動前の値) / 振動前の値 × 100)を測定した。結果を表-1a、b に示す。

表-1a. 各群における振動刺激前後の最大筋力の変化率

群名	変化率 (%)
前十字靭帯断裂群	4.4±4.0 ^{††}
前十字靭帯再建群	2.8±7.5 ^{††}
麻酔剤注入群	5.5±8.2 ^{††}
健常者群	-9.3±4.8

^{††} p<0.01, 健常者群の変化率との比較

表-1b. 各群における振動刺激前後の筋放電量の変化率

群名	VL 変化率 (%)	VM 変化率 (%)	RF 変化率 (%)
前十字靭帯断裂群	9.6±14.3 ^{††}	11.4±15.8 ^{††}	12.6±10.0 ^{††}
前十字靭帯再建群	4.2±8.6 ^{††}	8.1±14.0 ^{††}	1.0±7.0 ^{††}
麻酔剤注入群	7.0±13.6 ^{††}	11.0±19.7 ^{††}	7.8±10.3 ^{††}
健常者群	-17.6±14.6	-16.0±10.3	-16.8±17.0

^{††} p<0.01, 健常者群の変化率との比較

膝前十字靭帯断裂群、膝前十字靭帯再建群、麻酔剤注入群の振動刺激後の最大筋力と筋放電量の変化率は、健常者とは異なり、下降していないことがわかった。このように、膝前十字靭帯断裂患者や麻酔剤注入群の筋活動が、振動刺激に対して異常応答を示したことは、これらの患者の大腿四頭筋でガンマループの機能異常が存在している可能性を示唆している。このことから我々は、膝前十字靭帯断裂のように膝関節からのフィードバックを欠落させることが、ガンマループの機能を変化させる要因となりうると考えた。更に膝前十字靭帯再建患者も健常者とは異なる傾向を示しており、膝前十字靭帯断裂により引き起こされるガンマループの機能異常は、靭帯再建後も残存することが考えられた。

第三章の研究結果において、振動刺激後、膝前十字靭帯断裂群の最大筋力と筋放電量は、上昇しており、振動刺激後、最大筋力発揮時のアルファ運動ニューロンの活動が高まっていることを示している。このアルファ運動ニューロンの活動の上昇は、ガンマループを介して引き起こされていると考えられ、20分間の振動刺激により、膝前十字靭帯断裂患者のガンマループの活動が、上昇している可能性を示唆している。もし最大筋力発揮中のガンマループの活動が、上昇しているのならば、患者に対する更に長時間の振動刺激は、健常者と似た応答を引き起こすと考えられる。

よって第四章では、第三章の実験より更に長時間の振動刺激に対する患者の最大随意筋出力と大腿四頭筋の筋放電量の変化を測定した。20分間の振動刺激後、同じ患者にさらに30分の振動刺激を与えた結果として、これらの患者の最大筋力(変化率: $-2.0 \pm 8.2\%$)と筋放電量(変化率;VL: $-9.2 \pm 14.0\%$, VM: $-5.8 \pm 20.9\%$, RF: $-9.2 \pm 14.6\%$)は、減少傾向をみせ、20分振動刺激を与えたことによる増加傾向(変化率;最大筋力; $2.1 \pm 6.2\%$, 筋放電量;VL: $2.4 \pm 21.0\%$, VM: $17.3 \pm 19.8\%$, RF: $9.4 \pm 33.6\%$)とは、有意に異なる傾向を示した。このことは、合計50分もの長時間の振動刺激を与えることにより、患者の最大筋力と筋放電量は、減少傾向を示し、振動刺激に対するガンマループの応答が、正常に近いものになっている可能性を示している。一方20分間振動刺激後のアルファ運動ニューロンの活動性の一過性の上昇には、二つの機序が考えられる。1. 膝前十字靭帯断裂により引き起こされたガンマループの機能不全が、正常範囲内で一定程度改善することによるもの。2. 膝前十字靭帯断裂により引き起こされたガンマループの機能不全が、正常範囲内で改善するだけでなく、最大筋力発揮中のその活動が、正常範囲を超えて改善することによるものである。

そこで、第五章では、ガンマループの機能不全が存在しない健常者において、振動刺激の持続時間帯の推移に伴い一過性の最大筋力と筋放電量の上昇が存在するのかを確認する実験を行った。健常者に2分間と5分間の振動刺激を与えた結果、2分間ではやや上昇傾向、5分間ではやや下降傾向が見られるものの、大腿四頭筋の最大筋力と筋放電量は、振動刺激前の値と比較して有意な差が見られないことが判明した(表・2)。この結果から、ガンマループの機能不全が存在しない健常者の場合、最大筋力発揮中のガンマループの活動は、正常範囲を超えて上昇しないことが判明した。

表-2. 2分間、5分間の振動刺激前後の最大筋力と筋放電量の変化率

筋名	2分間の変化率 (%)	5分間の変化率 (%)
最大筋力	0.1±6.3	-3.0±4.5
VL	2.2±12.4	-1.8±9.3
VM	10.5±27.9	-4.3±8.3
RF	-0.1±3.4	-8.6±15.6

今回の一連の研究により、膝前十字靭帯損傷患者における大腿四頭筋の筋力低下には、膝前十字靭帯からのフィードバックの不全が関わっていることが証明された。大腿四頭筋最大筋力低下のメカニズムとしては、膝前十字靭帯のメカノレセプターからのフィードバックの欠除により生じたガンマループの機能不全が、アルファ運動ニューロンの高閾値運動単位の動員率を減少させることによっておこると考えられる。よって膝十字靭帯損傷患者のリハビリテーションにおいては高閾値運動単位の動員を促すためのアプローチを積極的に組み入れる必要がある。