

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18054

研究課題名（和文）膝外傷治療に対する生体力学的評価指標の確立と新規治療の検討

研究課題名（英文）Biomechanical assessment of the treatment for knee joint injury and development of novel treatment procedure

研究代表者

山川 学志（Yamakawa, Satoshi）

大阪大学・大学院医学系研究科・特任研究員（常勤）

研究者番号：40816740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、膝関節外傷に対する現行治療法の生体力学的評価を行い、現行法における課題を明らかにした。半月板損傷に対する治療では、治療後の修復部における安定性を指標に複数の手技に関して比較を行い、現行法の改善点を明確にした。また、前十字靭帯損傷に対する治療では、治療に用いる組織の力学特性に関して新たな知見を得た。これらの内容は、臨床手技を直接的かつ定量的に評価したことにより得られた知見であり、臨床手技へ直接的にフィードバックできるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関節外傷の治療では、生体組織の解剖学的な特徴を模倣する解剖学的外科治療が一般的に行われている。それらに対して本研究では、定量的なデータで治療の評価を行い、バイオメカニクス的なデータを基に現行治療法の課題を明らかにした。これらのデータは、現行治療法の改善に重要なデータであるだけでなく、解剖学的外科治療を生体力学的外科治療へとステップアップさせるための第一歩ともいえる。今後、この考え方が広まり、生体力学的に考案された治療法が開発され、関節外傷外科治療のレベルが一段と向上することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the current treatment procedures were biomechanically assessed. In the treatment of meniscus injuries, several techniques were compared based on the stability of the repaired site as an index, and the points of improvement of the current treatment procedure were clarified. In the treatment of anterior cruciate ligament injuries, new findings were obtained regarding the mechanical properties of the tissue used in the treatment. These findings were obtained through direct and quantitative assessment of clinical procedures, and can be directly fed back to clinicians.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：関節外傷 膝関節 前十字靭帯 半月板

1. 研究開始当初の背景

身体運動は種々の関節運動の総和として達成されるが、スポーツなど過度な負荷がかかり得る状況において、関節とその周辺組織に損傷をきたす関節外傷が発生する。関節外傷は、スポーツ中に頻発するが、特に膝関節外傷が多いことが知られている。スポーツ中における膝関節外傷の中で特に多い前十字靭帯 (ACL) 損傷と半月板損傷は、競技者のレベルを問わず受傷することが報告されており、治療の成果によって選手生命が左右されるだけでなく、その後の日常生活に支障をきたすことも多く、非常に大きな問題となっている。上記外傷の治療に際しては、手術を施す外科的治療が選択される場合がほとんどである。行われる手術では、正常組織の解剖学的形態を模倣するよう代替組織を用いて新たに作成 (再建) したり、損傷部を縫合して形態を復元したりする術式が近年の gold standard になっている。しかしながら、治療の本来の目的は、損傷により失われた組織の力学機能を回復させることであり、正常組織の形態の模倣や復元が組織の力学機能の再現という点で要求を満たしているかは未だ不明である。

ACL および半月板は膝の安定や衝撃吸収に欠かせないが、複雑な構造から、再建・復元されたそれらの組織が、力学的にいかにか正常組織に近いかが、これまでの研究では評価できていない。本研究ではこの問いに対し、画像解析と力学試験機を併用した独自手法で組織の変形と生理的荷重応答を解析することで、従来研究の限界を打破し、力学的に最適な術式の確立に貢献する。

2. 研究の目的

本研究は、力学的指標により ACL および半月板損傷に対する現行治療法である ACL 再建術と半月板縫合術を評価し、問題点の指摘ならびに改善法の提案を目的とする

3. 研究の方法

本研究では、ブタ膝関節を試料として各検討の力学試験を行った。力学試験には、関節力学試験ロボットシステム (テクノロジーサービス, 日本) と材料試験機 (SHIMADZU, 日本), 動的粘弾性試験機 (TA Instruments, 日本) を用いた。

4. 研究成果

1) 半月板縫合術における縫合部位が術後安定性に及ぼす影響

半月板損傷治療では、損傷した半月板を外科的に元の形状へと修復する半月板縫合術を施すのが一般的である。この手術では、損傷により裂けた半月板を縫合糸によって縫合するが、その縫合糸 (針) がどういった経路で刺入されるべきかを術後の縫合部安定性を指標に評価した研究は皆無であった。そこで本研究では、縫合部に繰り返し引張荷重を与え、荷重負荷前後の縫合部距離の差を開大距離として、その数値を基に縫合部の安定性を評価した。その結果、縫合針を関節内から関節外に向けて通す in-side out 縫合法において、縫合針が半月板実質を貫くように刺入する方が半月板周囲の関節包に刺入するよりも術後に安定した状態を保てることを示した (図 1: 赤色のルート)。また、関節包に刺入する場合でも、半月板に近い部位に刺入する方が遠い部位に刺入するよりも安定性が高いことも分かった (図 2)。

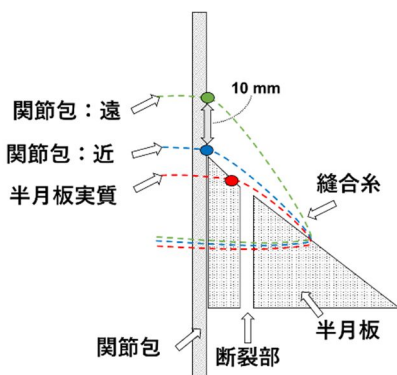


図1 縫合針 (糸) 刺入ルート

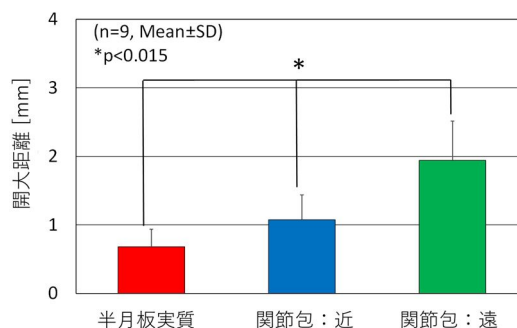


図2 繰り返し引張荷重に対する縫合部開大距離

現状では、縫合時に半月板実質を通すか関節包を通すかの判断は、半月板の損傷状態や術中の状況により術者が経験に基づいて選択することが多い。しかしながら、本結果より、縫合針刺入部位が術後の縫合部安定性に影響することが明らかとなった。術後の縫合部安定性は、縫合部の定着や癒合に始まる治癒過程において非常に重要であり、本結果は、手術の良好な結果を得るために重要なデータである。本結果に基づいて考えると半月板を縫合する際は、半月板実質に縫合糸が通るように縫合針を刺入することが縫合部の術後安定性を最も保証できる方法となる。ただし、状況によっては、半月板実質を通すことが難しく、関節包を通さざるを得ない場合もあるが、その場合は、出来る限り半月板に近い位置で半月板に刺入することで安定性を向上させることができると考えられる。この指標は、力学的データを基に縫合針刺入部位を提案した新規の指標であり、今後、これらを基に新たな治療法やその手技の改善が進むことを期待する。

2) 骨片つき膝蓋腱の屈曲角度 (Graft bending angle) が引張特性に与える影響

ACL 損傷では、損傷した ACL の代わりとなるように代替組織を大腿骨および脛骨の ACL 付着部に開けた骨孔を介して固定する ACL 再建術を施すのが一般的である。ACL 再建術では、骨孔を介して代替 ACL を固定するため、骨孔と代替 ACL 走行方向に角度変化が生じる (Graft bending angle: GBA, 図3)。この GBA により、代替 ACL が骨孔開口部と接触を起こし、骨孔拡大の原因となることなどが報告されている。しかし、GBA と代替 ACL の力学機能について検討している研究は皆無である。そもそも、代替 ACL には膝関節周辺の膝蓋腱などが用いられるが、生体内では関節運動による荷重方向変化は膝蓋腱の場合 30° 程度であるのに対し、GBA は 90° 前後と本来膝蓋腱が受け得る荷重方向とは異なる方向に荷重を受けることとなる。よって、GBA は代替 ACL の力学特性に影響を与える可能性がある。代替組織は、採材のしやすさや術後の影響が少ないといった視点で選ばれるが、力学特性の高さから選定されている側面もあるため、GBA が代替 ACL の力学特性に与える影響は手術の改善などに必要不可欠である。本研究では、ACL 再建術に用いられることの多い膝蓋腱に対し、引張方向を適宜変化させて、GBA が引張特性に与える影響を調べた。その結果、引張角度 (GBA) が 60° 以上になるとグラフトの剛性が 0° に対して有意に低下することが分かった (図4)。また、GBA が大きくなることで、荷重下における線維の緊張に偏りが生じることが分かった。これらのことより、GBA が大きくなることで荷重下における代替組織の生理的状況が崩れ、力学特性に影響を及ぼすことが明らかとなった。これは、現行術式の弱点を明らかにしたものであり、今後の術式改善に重要なデータとなり得る。

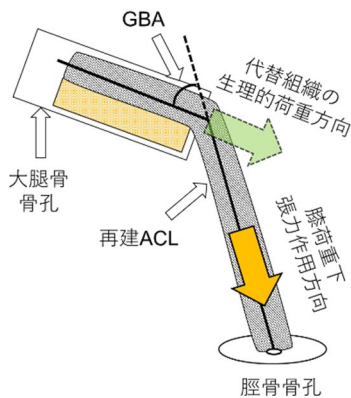


図3 骨孔と再建後のACL荷重作用方向が成す角 (Graft bending angle: GBA)

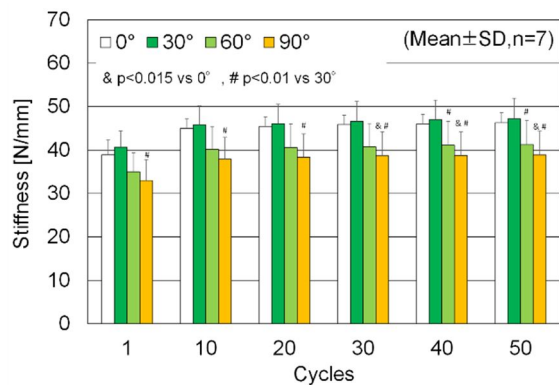


図4 各GBAにおける繰り返し引張荷重に対する膝蓋腱グラフトの剛性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamakawa Satoshi, Mae Tatsuo, Ogasawara Issei, Hirose Takehito, Konda Shoji, Nakata Ken	4. 巻 8
2. 論文標題 Placement of sutures for inside-out meniscal repair: both sutures through meniscal tissue reduces displacement on cyclical loading	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Orthopaedics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40634-021-00417-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山川 学志, 史野 根生, 大堀 智毅, 辻井 聡, 中田 研	4. 巻 44
2. 論文標題 膝蓋腱の骨 腱移行部角度（ACL再建術におけるGraft bending angle）が引張特性に与える影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山川 学志, 小笠原 一生, 辻井 聡, 大堀 智毅, 近田 彰治, 佐藤 世羅, 金本 隆司, 中田 研	4. 巻 44
2. 論文標題 半月板横断裂に対する部分切除による半月板内縁欠損は半月板の変形と逸脱を増大させる	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 山川 学志, 前 達雄, 小笠原 一生, 廣瀬 毅人, 近田 彰治, 中田 研
2. 発表標題 半月縫合術における縫合部位が術後安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 第48回臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Yamakawa, Tatsuo Mae, Issei Ogasawara, Takehito Hirose, Shoji Konda, Ken Nakata
2. 発表標題 Stitching through mid-substance region of meniscus for the repair of longitudinal meniscal tear prevents widening of the stitched part after cyclic loading
3. 学会等名 Orthopaedic Research Society Annual Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川 学志, 史野 根生, 大堀 智毅, 辻井 聡, 中田 研
2. 発表標題 骨片つき膝蓋腱の屈曲角度 (ACL再建術におけるGraft bending angle) が引張特性に与える影響
3. 学会等名 第49回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川 学志, 小笠原 一生, 辻井 聡, 大堀 智毅, 近田 彰治, 佐藤 世羅, 金本 隆司, 中田 研
2. 発表標題 半月板横断裂に対する部分切除による半月板内縁欠損は半月板の変形と逸脱を増大させる
3. 学会等名 第49回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川 学志, 前 達雄, 小笠原 一生, 廣瀬 毅人, 近田 彰治, 中田 研
2. 発表標題 受動的屈曲伸展運動下における半月縫合部の安定性評価
3. 学会等名 第49回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Yamakawa, Daisuke Suzuki, Tatsuo Mae, Hiromichi Fujie, Ken Nakata
2. 発表標題 Satoshi Yamakawa, Daisuke Suzuki, Tatsuo Mae, Hiromichi Fujie, Ken Nakata
3. 学会等名 9th World Congress of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Yamakawa, Tomoki Ohori, Issei Ogasawara, Akira Tsujii, Shoji Konda, Seira Sato, Takashi Kanamoto, Ken Nakata
2. 発表標題 Loss of the meniscal inner part by partial meniscectomy for radial meniscal tear increases the meniscal deformation and extrusion
3. 学会等名 Orthopaedic Research Society Annual Meeting2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Yamakawa, Tomoki Ohori, Issei Ogasawara, Akira Tsujii, Shoji Konda, Seira Sato, Takashi Kanamoto, Ken Nakata
2. 発表標題 PARTIAL MENISCECTOMY OF THE MENISCAL INNER PART INCREASES THE MENISCAL DEFORMATION AND EXTRUSION
3. 学会等名 Summer Biomechanics, Bioengineering and Biotransport Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------