

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K09409

研究課題名（和文）損傷・修復半月板の3次元総合的解析および新たな縫合法の探索

研究課題名（英文）3-dimensional comprehensive analysis of injured-/repaired meniscus and clarification of new suture techniques

研究代表者

前 達雄（MAE, TATSUO）

大阪大学・大学院医学系研究科・招へい教授

研究者番号：10569734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：半月板は荷重分散、衝撃吸収、潤滑等の機能を有しており、膝関節における重要な役割を担っている。我々は、損傷・修復半月板の荷重変化や関節間の圧変化、そして動態変化を総合的に評価することを目的に、1) 生理的荷重下における半月板の逸脱を損傷幅の異なる半月で評価し、損傷幅の増加に伴い逸脱量も増加することを示した。また、2) 繰り返し垂直荷重に対する半月板縫合強度の評価として、半月板荷重を計測する方法の確立および3) 生理的な荷重条件下での半月板縫合強度を、縫合部の開大として評価する方法の確立を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半月板損傷はスポーツ活動や加齢により起こり、外科的治療の大半は切除術が施されている。しかし切除後は変形性関節症性変化が生じることが多数報告されており、半月板の機能温存可能な縫合術の成績向上は社会的な重要課題である。半月板の生体力学的研究は散見されるが、いずれも断片的かつ非生理的な評価しかされていなかった。本研究では、生理的な荷重環境における損傷半月の動態を示し、治療法の開発に繋がるものと期待する。さらに、半月板縫合法の新しい評価法を確立したことにより、縫合方法の改良につながると思われる。

研究成果の概要（英文）：Meniscus plays an important role in the knee joint by providing load distribution, shock absorption, and lubrication. We believe that a comprehensive evaluation of the dynamic changes of the injured and repaired meniscus, including changes in loading and inter-articular pressure, is important for establishing treatment methods. 1) Evaluation of meniscus deviation under physiological loading was performed on menisci with different tear widths, and it was shown that the amount of deviation increased as the tear width increased. In addition, 2) a method for measuring meniscus load was established to evaluate meniscus suture strength under repeated vertical loading, and 3) a method for evaluating meniscus suture strength as suture opening under physiological loading conditions was established.

研究分野：整形外科

キーワード：半月板 生体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半月板は前角と後角を脛骨に強固に付着し、hoop 機能にて荷重分散、衝撃吸収、潤滑および膝安定化等の重要な役割を担っている。半月損傷はスポーツ活動や加齢により起こり、外科的治療の大半は切除術が施されている。しかし切除後は変形性関節症性変化が生じることが多数報告されており、半月板の機能温存可能な縫合術の成績向上は社会的な重要課題である。

半月板の損傷により hoop が破綻すると、半月板は関節外へ逸脱し、半月板の機能が損なわれることから、損傷が膝関節に及ぼす影響および縫合術による機能改善を調べた研究が散見される。

Bedi A ら¹⁾は、膝関節内(半月板と脛骨の間)に圧力分布測定センサーを挿入し、損傷半月および縫合半月の大腿骨-脛骨関節間に生じる圧および関節軟骨の接触面積を調べている

が、大腿骨-脛骨の位置関係が生理的ではない上に、半月板自体の荷重や動態の計測はできていなかった。また、Barber FA ら²⁾は、ブタ半月板を採取し、線維方向に2つに切離した後に縫合を行い、半月板自体を把持して、縫合糸の違いによる縫合強度への影響を調べた。

Iuchi ら³⁾は、ブタ半月板単体ではなく、大腿骨-半月板-脛骨複合体として関節周囲組織を付着することで、より生理的な環境での半月縫合部の強度を調べているが、先行研究と同様に半月板自体に力学的負荷を加えるため、荷重分散や衝撃吸収能などの生理的評価はできていなかった。

我々は、関節の自然な運動が再現でき、生体関節の3次元力学的挙動を調べる事が可能な関節力学試験用ロボット(図1)⁴⁾を用い、ブタ膝の大腿骨-脛骨関節に荷重を加えた際に、外側半月横断裂による荷重変化を報告している。⁵⁾ 本手法は、生理的な膝関節運動における荷重負荷が可能な点、および半月板に生じる荷重計測が可能な点が利点であり、その特徴を活かして生理的な荷重環境における半月板への荷重計測を行うことを試みた。



図1：関節力学試験用ロボット

2. 研究の目的

食用ブタ膝を用い

1) 半月板3次元動態の新しい評価方法の確立

2) 生理的な荷重環境である繰り返し垂直荷重・膝屈曲伸展運動を大腿骨-脛骨関節に行うことによる、損傷・修復半月板の荷重・動態、関節間圧の総合的評価法確立

を目的とした。

3. 研究の方法

生体関節力学試験用ロボットシステムに食用ブタ膝を装着し、荷重負荷を行った。

(1) 半月板3次元動態の新しい評価方法の確立

ブタ膝の膝窩筋を除く膝周囲筋と外側関節包を除去し、関節力学試験用ロボットに装着した。続いて、外側側副靭帯の前後縁から5mmの距離で外側半月板の前中節(AM)、中後節(MP)の外周壁に4mm反射マーカを設置した。正常膝に対し膝屈曲30度で垂直荷重300Nを負荷し、脛骨に対する半月板変位(マーカ変位)を計測した。次に外側半月板中節に内縁から30、60および90%幅の横断裂を順に加え、同様の荷重に対する半月変位を計測した。脛骨プラトーの最大横径であるX軸(外側;+)と、これに垂直なY軸(前方;+)で座標系を設定し、この2方向の変位を記録した。(図2)

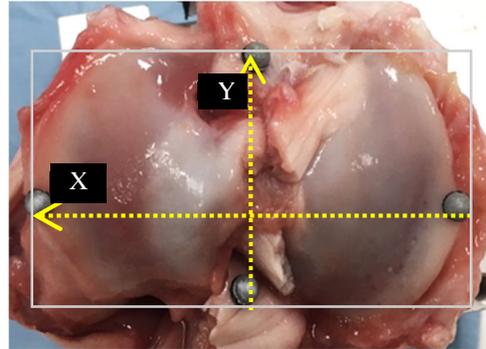


図2:脛骨上での座標軸

(2) 生理的な荷重環境である繰り返し垂直荷重・膝屈曲伸展運動を大腿骨-脛骨関節に行うことによる、損傷・修復半月板の荷重・動態、関節間圧の総合的評価法確立

A) 繰り返し垂直荷重に対する半月板縫合強度の評価方法の確立

ブタ膝周囲の筋肉及び膝蓋骨-膝蓋腱を除去したのち、関節力学試験用ロボットに設置し、30度屈曲位で0-250Nの垂直荷重を100回加え、脛骨に生じた荷重およびpathを記録した。次に外側半月板中節に関節包に達する100%横断裂を加え、同様の試験を行った。最後に、2-0縫合糸1本を断裂部に垂直に縫合し、同様の試験を行った。半月板を切除後に、先に記録したpathを用いて試験を繰り返し、得られた荷重データから重ね合わせの原理を用いて半月板の荷重を計算した。

B) 生理的な荷重条件下での半月板縫合強度の評価方法の確立

ブタ膝の内側半月と内側側副靭帯,内側関節包を温存しつつ、大腿骨及び脛骨より軟組織を切除した。内側半月の外縁を3mm幅で残して、内側半月板を線維の走行に沿って切離し、前角と後角に#5ポリエステル糸をKrackow sutureにて縫合した。切離半月を元の位置に戻し、両端針付き2-0ポリエステル糸を用い、1端を切離半月に通した。もう一端を、辺縁の残存半月実質に通す群(A群)残存半月外縁近傍の関節包に通す群(B群)残存半月外縁から10mm近位の関節包に通す群(C群)の3群に分け、それぞれinside-out法にて縫合を行った。(図3)脛骨-関節包-大腿骨を材料試験機の下方に、切離半月に縫合した#5ポリエステル糸を材料試験機の上方に設置し、5-20Nの張力を300回繰り返す繰り返し試験と破断試験を行い、繰り返し荷重前後の縫合部の離開と縫合部の破断荷重を求めた。

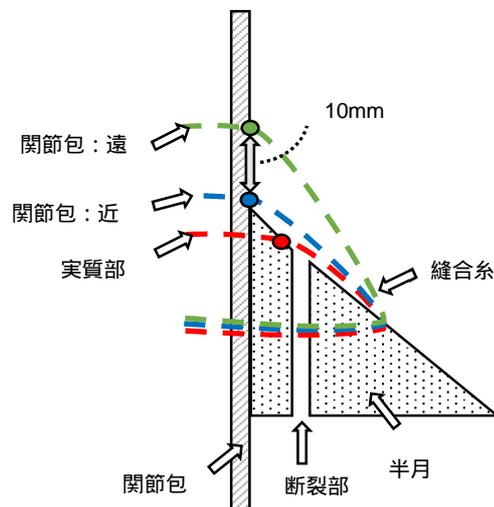


図3:半月板縫合針の刺入部位

4. 研究成果

(1) 半月板 3 次元動態の新しい評価方法の確立

垂直荷重時の Y 軸変位は、AM 部 (正常膝 / 30% / 60% / 90% 幅断裂膝) は $0.5 \pm 0.6 / 0.4 \pm 0.7 / 0.3 \pm 0.9 / 2.0 \pm 2.1 \text{mm}$ 、MP 部は $0.3 \pm 0.5 / -1.1 \pm 1.0 / -0.4 \pm 0.5 / -1.1 \pm 1.6 \text{mm}$ であり、90% の断裂幅で AM 部は前方へ、MP 部は後方へ有意に変位した (vs intact; $p=0.03$)。一方、X 軸変位は断裂幅によって有意な変化は認めなかった。

(2) 生理的な荷重環境である繰り返し垂直荷重・膝屈曲伸展運動を大腿骨-脛骨関節に行うことによる、損傷・修復半月板の荷重・動態、関節間圧の総合的評価法確立

A) 繰り返し垂直荷重に対する半月板縫合強度の評価方法の確立

垂直荷重を 1 回加えた際の荷重は、正常半月板では $113 \pm 38 \text{N}$ 、横断裂半月板で $56 \pm 21 \text{N}$ 、縫合半月板で $80 \pm 47 \text{N}$ であり、断裂半月板と他の 2 群間に有意差を認めた。(図 4)

100 回の繰り返し荷重負荷により、正常半月板および横断裂半月板は緩やかに荷重が減少したが、修復半月板では 10 回の繰り返し荷重で 78% と大きく低下し、そのまま 100 回まで荷重の変化はほとんど認めなかった。

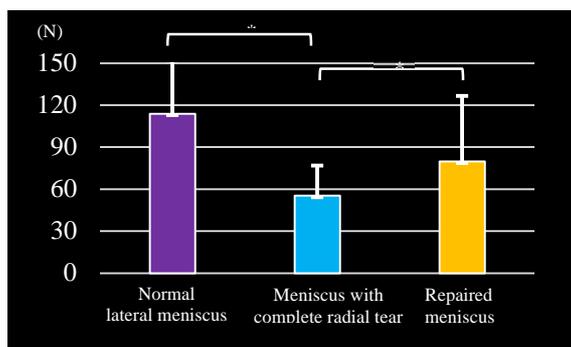


図 4 : 垂直荷重 1 回での半月板荷重

B) 生理的な荷重条件下での半月板縫合強度の評価方法の確立

繰り返し荷重前後における縫合部の離開は A 群 $0.7 \pm 0.3 \text{mm}$ 、B 群 $1.1 \pm 0.4 \text{mm}$ 、C 群 $1.9 \pm 0.6 \text{mm}$ と 3 群間に有意差を認めた。(図 5) 一方、破断荷重は、A 群 $59.1 \pm 13.6 \text{N}$ 、B 群 $60.0 \pm 7.9 \text{N}$ 、C 群 $57.4 \pm 4.7 \text{N}$ と 3 群間に有意差はなかった。

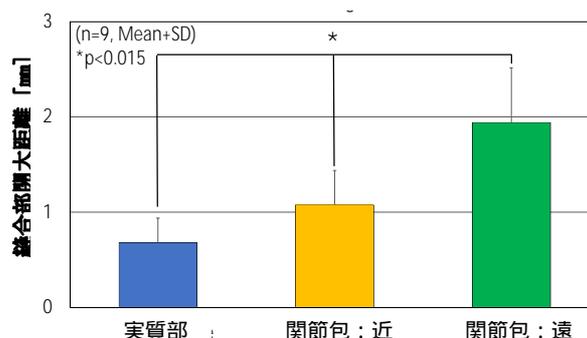


図 5 : 繰り返し加重負荷による縫合部開大距離

<引用文献>

- 1) Bedi A, Kelly NH, Baad M, et al. Dynamic contact mechanics of the medial meniscus as a function of radial tear, repair, and partial meniscectomy. J Bone Joint Surg Am 2010 Jun; 92(6): 1398-1408.
- 2) Barber FA, Herbert MA, Schroeder FA, et al. Biomechanical testing of new meniscal repair techniques containing ultra high-molecular weight polyethylene suture. Arthroscopy 2009 Sep; 25(9): 959-967.
- 3) Iuchi R, Mae T, Shino K, et al. Biomechanical testing of transcapsular meniscal repair. J Exp Orthop 2017 Dec; 4(1): 2.
- 4) Fujie H, Livesay GA, Fujita M, et al. Forces and moments in six-DOF at the human knee joint: Mathematical description for control. J Biomech, 1996 Dec; 29(12): 1577-1585.
- 5) Tachibana Y, Mae T, Fujie H, et al. Effect of radial meniscal tear on in situ force of meniscus and tibiofemoral relationship. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2017 Feb; 25(2): 355-361.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Hirose T, Mae T, Ogasawara I, Yamakawa S, Nakata K, Ohori T, Tsujii A, Okada S.	4. 巻 50
2. 論文標題 Meniscal Displacement and Loss of Load-Transmission Function After Radial Tear of the Lateral Meniscus in a Porcine Model: New Insights Into the Functional Dynamics of the Injured Meniscus.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Am J Sports Med	6. 最初と最後の頁 1850-1857
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/03635465221090543	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 李 知香, 山川学志, 廣瀬毅人, 井内 良, 中田 研, 金本隆司, 北 圭介, 前 達雄	4. 巻 43
2. 論文標題 ブタ内側半月板縫合の力学的強度 : inside-out法 vs all-inside法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 107-111
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 Yamakawa S, Mae T, Ogasawara I, Hirose T, Konda S, Nakata K.	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 J Orthop Exp	6. 最初と最後の頁 94
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 Hirose T, Mae T, Ogasawara I, Yamakawa S, Nakata K, Ohori T, Tsujii A, Okada S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Meniscal Displacement and Loss of Load-Transmission Function After Radial Tear of the Lateral Meniscus in a Porcine Model: New Insights Into the Functional Dynamics of the Injured Meniscus.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Am J Sports Med	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） 10.1177/03635465221090543	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 Ohori T, Mae T, Shino K, Fujie H, Hirose T, Tachibana Y, Yoshikawa H, Nakata K.	4. 巻 29
2. 論文標題 Different effects of the lateral meniscus complete radial tear on the load distribution and transmission functions depending on the tear site.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.	6. 最初と最後の頁 342-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00167-020-05915-8	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 Mae T, Nakata K, Yokoi H, Ohori T, Sato S, Hirose T, Uchida R.	4. 巻 29
2. 論文標題 Knot location in arthroscopic inside-out meniscal repair: Cadaveric evaluation.	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 J Orthop Sci.	6. 最初と最後の頁 217-223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jos.2022.12.006	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12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 前 達雄、中田 研、横井裕之、大堀智毅、佐藤世羅、廣瀬毅人、内田良平、辻井 聡、中川滋人
2. 発表標題 シンポジウム「半月板修復術の適応と実際」 inside-out法の適応と実際
3. 学会等名 JOSKAS-JOSSM 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻井 聡、廣瀬毅人、佐藤世羅、前 達雄、中田 研、米谷泰一、濱田雅之、大堀智毅、内田良平、岡田誠司
2. 発表標題 外側半月板縦断裂単独損傷に対するinside-out縫合術直後の半月板偏位量
3. 学会等名 JOSKAS-JOSSM 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前 達雄、橘 優太、大堀智毅、廣瀬毅人、山川学志、中川滋人、中田 研
2. 発表標題 シンポジウム「運動器のバイオメカニクス ～基礎と臨床の架け橋～」 損傷半月板のバイオメカニクス
3. 学会等名 第37回日本整形外科基礎学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬毅人、前 達雄、山川学志、小笠原一生、近田彰治、武 靖弘、中田 研
2. 発表標題 半月板修復法の違いが半月板の受ける荷重に与える影響
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、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 廣瀬毅人、前 達雄、辻井 聡、下村和範、大堀智毅、佐藤世羅、中田 研
2. 発表標題 ACL損傷膝における外側半月板逸脱：縦断裂及び横断裂の影響
3. 学会等名 第13回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会（JOSKAS）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬毅人、前 達雄、小笠原一生、山川学志、中田 研、大堀智毅、岡田誠司
2. 発表標題 半月板荷重分担能と半月板変位の関連性. -半月板部分損傷モデルにおける検討-
3. 学会等名 第36回日本整形外科基礎学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬毅人、前 達雄、小笠原一生、山川学志、中田 研
2. 発表標題 半月板横断裂幅と膝屈曲角度は非荷重時の外側半月板位置に影響を与えるか？
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021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 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回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 知香、山川学志、廣瀬毅人、井内 良、中田 研、金本隆司、北 圭介、前 達雄
2. 発表標題 ブタ内側半月板縫合の力学的強度: inside-out法 vs all-inside法
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原一生、山川学志、廣瀬毅彦、大堀智毅、鶴野裕基、前達雄、中田研
2. 発表標題 光学式モーションキャプチャシステムによる生体組織の微小変位計測の正確度と精度：ミニブタ半月板を用いた検討
3. 学会等名 日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬毅彦、前達雄、小笠原一生、山川学志、大堀智毅、中田研
2. 発表標題 半月板損傷幅と損傷半月板変位の関連性 - 光学式motion captureシステムと関節シミュレーターの併用による解析 -
3. 学会等名 日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 前 達雄、辻井 聡	4. 発行年 2022年
2. 出版社 メディカ出版	5. 総ページ数 12
3. 書名 整形外科Surgical Technique.	

〔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
研究 分担者	中田 研 (Nakata Ken) (00283747)	大阪大学・医学系研究科・教授 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	大堀 智毅 (Ohori Tomoki) (30869920)	大阪大学・医学部附属病院・医員 (14401)	2021年で終了

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