

テクニカル・ノート

## 半月板円周繊維増強術：生体力学的関節鏡 下半月板修復法

喜多啓介医学博士、草野雅史医学博士、辻井彰医学博士、大堀智樹医学博士、田中雄大医学博士、中村憲正医学博士、中田健医学博士。

要旨：ヒトの膝半月板の橈側断裂は、円周方向のフープ応力の喪失をもたらし、膝関節の変性と高い相関関係がある。半月板橈側断裂の修復には、インサイド・アウト、アウトサイド・イン、オール・インサイドなど様々な手術手技があるが、従来の修復手技は損傷部分の安定化のみに焦点が当てられていた。このテクニカルノートでは、生体力学的な観点から半月板の治癒を促進するために、従来の修復術と同時に半月板円周方向の繊維を増強する半月板修復術について述べる。

**T** 膝半月板はC字型の線維軟骨構造で、荷重伝達、安定化、潤滑、衝撃吸収に重要な役割を果たしている。<sup>1</sup>半月板のコラーゲン線維は、表層のランダム配向線維、円周線維、放射状のタイ線維からなる。<sup>2</sup>このうち円周方向繊維は、垂直方向の圧縮荷重を円周方向のフープ応力に変換する役割を担っている。半月板の断裂は膝関節内損傷の中で最も多く、半月板損傷の断裂パターンは一般に、縦/長手方向、橈側/横方向、水平/複合型の3種類に分類される。

を報告する。ICMJE 著者情報開示フォームの全文は、[補足資料として本論文のオンライン版に掲載されている](#)。

2023年4月7日受領、5月28日受理。

宛先：〒553-0003 大阪府大阪市福島区福島4-2-78 JCHO大阪病院整形外科学スポーツ医学科 喜多啓介 (M.D., Ph.D.)。E-mail: [keikita@hera.eonet.ne.jp](mailto:keikita@hera.eonet.ne.jp)

© 2023 Arthroscopy Association の代理として Elsevier Inc. が発行。  
北米のこれは CC BY-NC-ND ライセンスの下でのオープンアクセス記事である (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)。

2212-6287/23536

<https://doi.org/10.1016/j.eats.2023.05.015>

JCHO大阪病院整形外科学スポーツ医学講座 (K.K., M.K., Y.T.)、  
大阪大学大学院医学系研究科 整形外科学 (A.T., T.O.)、大阪体育  
大学スポーツ医科学研究所 (N.N.)、大阪大学大学院医学系研究科  
健康スポーツ科学講座 (K.N.)。

著者らは、本論文の執筆および発表に関して利害関係がないこと

外側半月板中間部の橈側断裂は若いアスリートに多く、内側半月板後根部の橈側断裂は高齢者に多い。この病態は半月板の周方向線維を破壊し、その結果、膝関節の接触面積が減少し、接触圧が増加する。<sup>3</sup> その結果、退行性変化や変形性関節症の発生率が増加する。半月板放射状断裂の修復については、数多くの手技が報告されている。<sup>4</sup> しかし、損傷した半月板組織は血管が貧弱であるため治癒能力に限界があり、手術後の半月板の治癒は時に不十分である。本テクニカルノートでは、従来の修復術に人工靭帯テープを併用し、半月板円周線維を増強することで

、生体力学的観点から半月板の治癒を促進する半月板修復術の手技について述べる。

### 適応症

この手技は、磁気共鳴画像法を用いて評価された橈骨半月板断裂の全患者に適応される。このテクニカル・ノートでは、右膝外側半月板中央部の橈側断裂に対する半月板円周ファイバー補強法を紹介する。

### 手術手技（ビデオイラスト付き）

手術手技は[ビデオ1](#)に示されている。

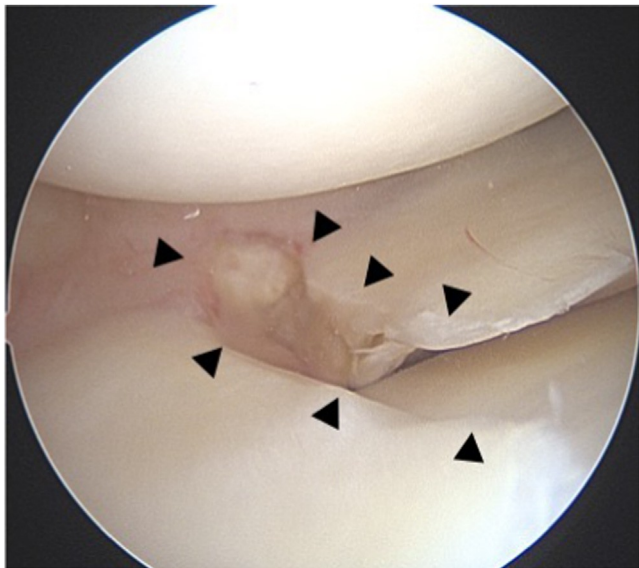


図1. 外側半月板中央部の完全橈側断裂を示す前外側ポータルからの右膝関節鏡像。

#### ステップ1: 切開とアプローチ

患者は全身麻酔下で仰臥位になり、両腕をアームボードに乗せる。患者の大腿近位部に空気止血帯を装着した後、患側の下肢を大腿部外側にサイドサポートで固定し、膝の角度を90度(°)にできるように足の下に取り付け可能なフットレストを装着する。

術式は、まず膝関節鏡検査から開始し、従来の前内側および前外側ポータルを用いて関連損傷を診断する(図1)。その後、遠位前内側(FAM)ポータルと、前外側(FAM)ポータルから膝関節鏡検査を行う。

膝関節外側に8cmの皮膚切開を行う(図2)。腸脛靭帯を切開して確認する。次に、上腕二頭筋腱挿入部と腸脛靭帯の間を確認し、切開する。後外側包と外側腓腹筋腱の間を鈍的に展開し、包の後方にアプローチするために、Henning retractorをその間に挿入する。

ステップ2: 半月板縫合テープを半月板円周繊維に沿って導入する。

Henningシステムによるインサイドアウト半月板修復術が全過程で使用される(図3)。<sup>5</sup>両端に針がついた高強度(超高分子量ポリエチレンからなる)1.5mm幅の人工靭帯テープ(M Braid、Stryker Japan、東京、日本)(図4)を円周方向の補強に採用する。膝内側から半月板前角に向かって長い針を刺入する。針の方向を確認し、FAMポータルを形成する。FAMポータルに挿入した金属カニューレを通して、外側半月板前角の外縁を人工靭帯テープの針で貫通させる。針は前方に押し出され、半月板の前外側から引き抜かれ、人工靭帯テープは前角から半月板の前外側へと配置される(図5A)。その後、人工靭帯テープに付いている針を切断する。人工靭帯テープが腸脛靭帯を貫通している場合は、腸脛靭帯の下から引き抜く。

従来のHenning半月板縫合糸(Stryker Japan、東京)に取り付けた長さ8cmの針を、被膜の前外側から後外側に挿入する(図5B)。この過程で、針が周方向線維の内側にあることを確認する。



図2.右膝の術前マーキング。

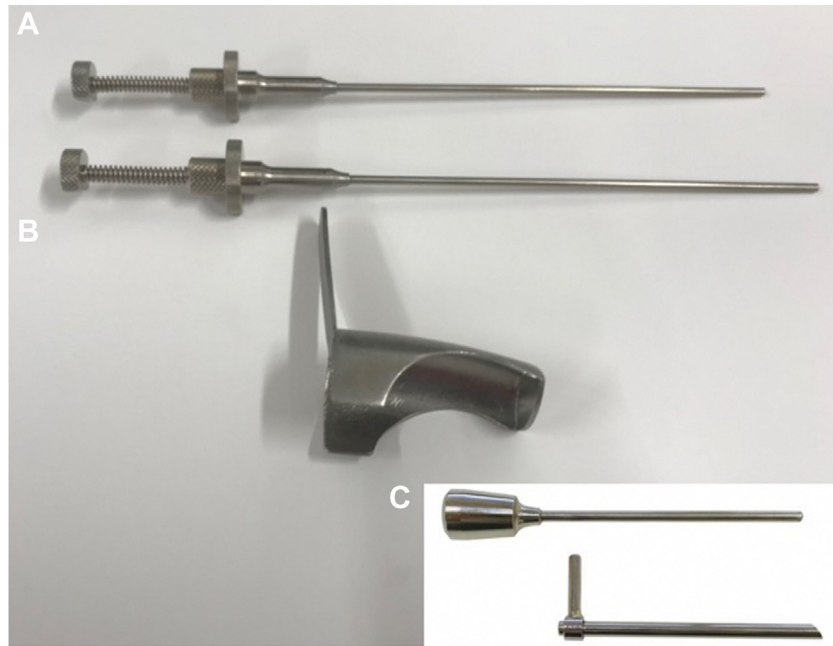
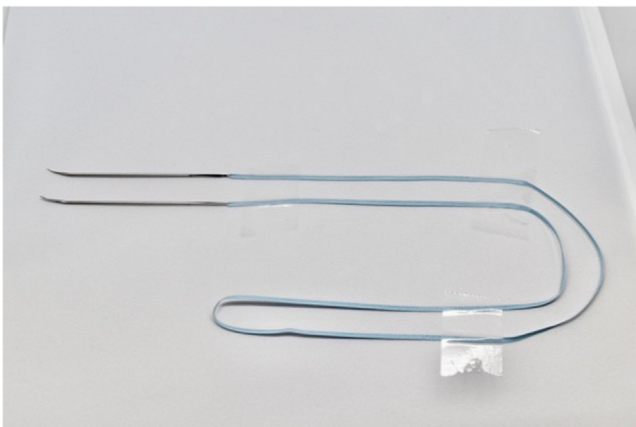


図3.インサイドアウト半月板修復術のHenningシステム（Stryker Japan、東京、日本）。(A) ニードルホルダー、(B) リトラクター、(C) カニユーレ。

半月板の関節鏡検査で半月板損傷部位の針が確認されることもある。その後、針をHenning retractorから引き抜き、前外側で縫合糸を結んで縫合糸中継用のループを準備する。人工靭帯テープは半月板の中間部を通り、前外側から後外側の被膜へと渡される(図6)。

従来のHenning半月板縫合糸（Stryker Japan、東京、日本）を半月板後角の下から後外側被膜に挿入し、通常のインサイド・アウト法と同様にリトラクターから引き抜く。針は切断され


図4.高強度（超高分子量ポリエチレンからなる）1.5mm幅の人工靭帯テープ（M Braid、Stryker Japan、東京、日本）。



縫合糸を結んで中継用のループを作る。次に、人工靭帯テープを後被膜から半月板後角に通す。人工靭帯テープは、前外側被と後外側被の両方にかかる円周線維の周囲に配置される。

### ステップ3: 人工靭帯テープの固定

直径5mmのシリコン製カニューレを前外側門に留置する。半月板前角のごく一部を削り、脛骨を露出させる。人工靭帯テープの前方部を、セルフパンチング式オールPEEKノットレスアンカー（Omega、Stryker Endoscopy社、カリフォルニア州サンノゼ）に取り付け、脛骨に固定する。

距骨の近位で1cmの縦切開を行う。この切開創から、ACUFEX Director ACL Tibial Aimer（Smith & Nephew Endoscopy, Andover, MA）を用いて、脛骨前面から外側半月板後方附着部まで2.4mmのKワイヤーを留置する。ドリル穴から、Suture Retriever（Smith & Nephew Endoscopy社製）を用いて脛骨前面から後角の人工靭帯テープを回収する。テープが半月板の内側にあることを確認し、脛骨前面のテープを引っ張って半月板のずれを縮小する。人工靭帯テープを引っ張りながら、断裂した半月板のそれぞれの切り株を関節鏡で近接して確認し（7）、同様のアンカー（オメガ、ストライカー内視鏡）を用いて縫合テープを脛骨に固定する。

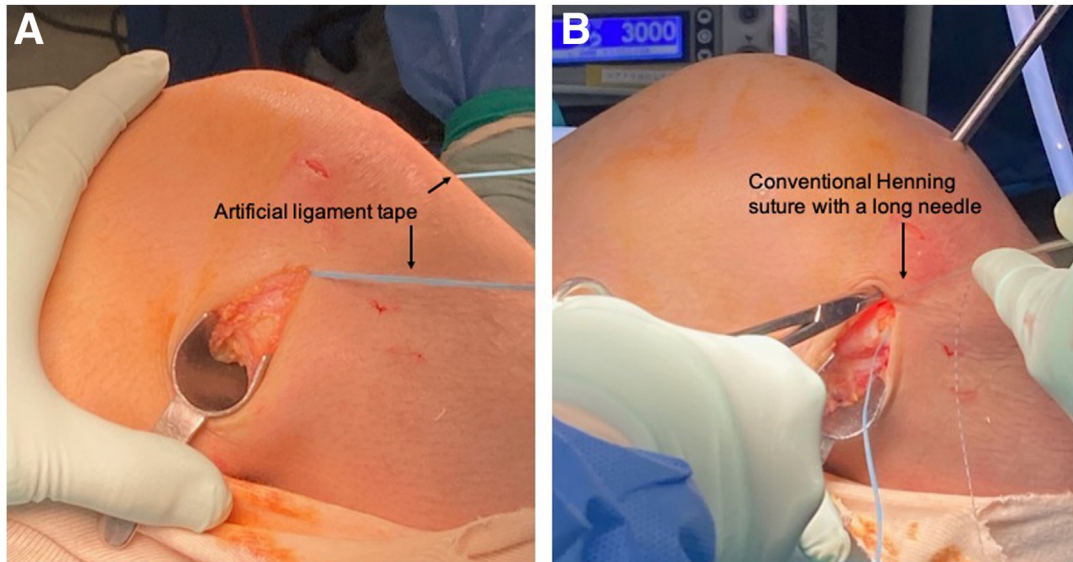


図5.人工靭帯テープをFAM門から莢膜の前外側へ通す(A)。従来のHenning半月板縫合糸を装着した長さ8cmの針を莢膜の前外側から後外側に挿入する。(B).(FAM、はるか前内側)。

#### ステップ4: 従来のインサイド・アウト修理

円周方向の繊維補強により断裂部位は近付いたが、不安定性が残るため、従来の修復縫合を追加し、断裂部位を安定させた。前外側門から縮小した断裂部位を確認し、Zone Specific II Meniscal Repair System (ConMed Linvatec、

示す前外側ポータルからの右膝関節鏡視図。

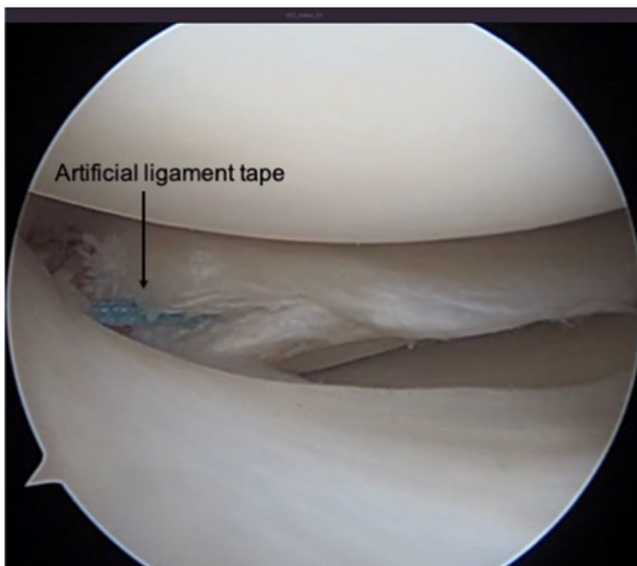


図6.断裂した半月板に人工靭帯テープを貼付した状態を

Largo,FL)を前外側から挿入する(図8)。大腿二頭筋と腸脛靭帯の間の裂け目は吸収性縫合糸で修復され、切開部は標準的な方法で閉鎖される(図9; 表1および表2)。

#### 術後のリハビリテーション

膝の可動域訓練後、2週間ソフトブレースで膝を固定する。松葉杖を用いた部分的な体重負荷は3週間後に開始する。完全体重負荷は4週間後に開始する。閉鎖運動連鎖運動は術後4ヵ月まで禁止する。スポーツ参加は術後6ヵ月から可能である。

#### ディスカッション

半月板橈側断裂の手術管理については、さまざまな手技が報告されている。<sup>4</sup>ほとんどの手技は、断裂部位をどの程度安定させるかにのみ焦点が当てられている。しかし、Branch et al.<sup>6</sup>は、オールインサイド・水平、インサイドアウト・水平、MasoneAllenコンストラクトと比較して、figure-of-8+水平コンストラクトが最も強靭であったと報告しているが、figure-of-8+水平コンストラクトの最大破壊荷重は、コントロールの約4分の1であった。Buckley et al.<sup>7</sup>は、脛骨に2本のトンネルを断裂部直下に形成し、金属ボタンで脛骨前面の縫合糸を引き抜いて半月板断裂を固定する「ハイブリッド・トンネル」修復術は、これまでに報告されている術式よりも効率的であると結論づけた。しかし、これは



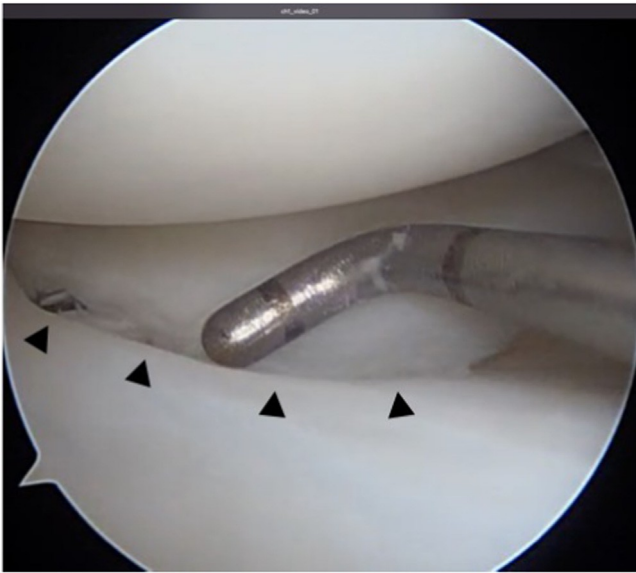


図7.脛骨前面の靭帯テープを引っ張ることで、断裂した半月板が縮小している様子を示す、前外側ポータルを介した右膝の関節鏡像。

半月板が脛骨表面の中央部に固定されている点から、解剖学的アプローチである。これに対し、半月板円周補強法は、膝関節の屈曲・伸展に伴う半月板の自然な動きを妨げることなく、半月板の円周方向の繊維を補強することで、フープ応力に対する抵抗力を作り出し、高度に解剖学的な再建術であると考えられる。新しい観点からは、この手技は半月板の治癒を促進する可能性がある。

表1.長所と短所

メリット

断裂した半月板をより強固に固定する。

メニスカス

カプセルでフープ応力に対する抵抗力を生み出す 自然なメニスカスの保持

特定の器具を使用する必要がない

エクストルージョンを誘発するすべての半月板断裂に

適応 不利な点

適切な張力に関するコンセンサスは得られ

ていない 人工靭帯テープの耐久性

従来の半月板縫合法に比べて侵襲性が高い

半月板のはみ出しは、変形性膝関節症に大きく関連するため、治療が必要な深刻な問題である。半月板の断裂としては、内側半月板後根の橈骨断裂、円板状外側半月板の断裂、膝関節安定時の外側半月板中間部の橈骨断裂、前十字靭帯損傷に伴う外側半月板後角の橈骨断裂、半月板の変性などが考えられ、半月板外反の原因としては、内側半月板後根の橈骨断裂、円板状外側半月板の断裂、膝関節安定時の外側半月板中間部の橈骨断裂、前十字靭帯損傷に伴う外側半月板後角の橈骨断裂、半月板の変性などが考えられる。これらの断裂の病態は、半月板の周方向線維の破綻である。われわれの手技は、半月板の押し出しを誘発するすべての半月板断裂に適用できる。

しかし、この技術にはいくつかの限界がある。生体力学的研究では、この手技が円周方向のフープ応力に耐えるのに十分であるかどうかは検証されていない。Park et al.<sup>8</sup>Parkらは、ウサギとブタの半月板に後根部断裂と前根部断裂を生じさせ、半月板周囲の円周補強を行なったが、これはわれわれの技術（）と同様であり、半月板のはみ出しの程度を減少させ、関節炎の進行を防いだ。テクニカルノートで使用した高強度（超高分子量ポリエチレン）1.5mm幅の人工靭帯テープの耐久性

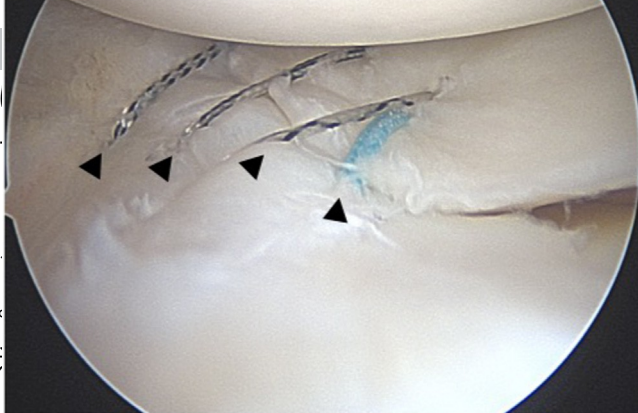


図8.右膝の前外側ポータルからの関節鏡視図。断裂部位が4本の従来型インサイドアウト縫合により安定化されている。

## 表2.真珠と落とし穴

### 真珠

縫合針が円周方向内側にあることを確認する。

半月板の繊維

針の方向がわからなくなった場合は、追加の基準針を関節に挿入する。

莢膜と腓腹筋腱の間はヘニングリトラクターで固定する。

### 落とし穴

靭帯、腱、神経を貫通させないテープの締め過ぎは膝関節拘縮の原因となる。

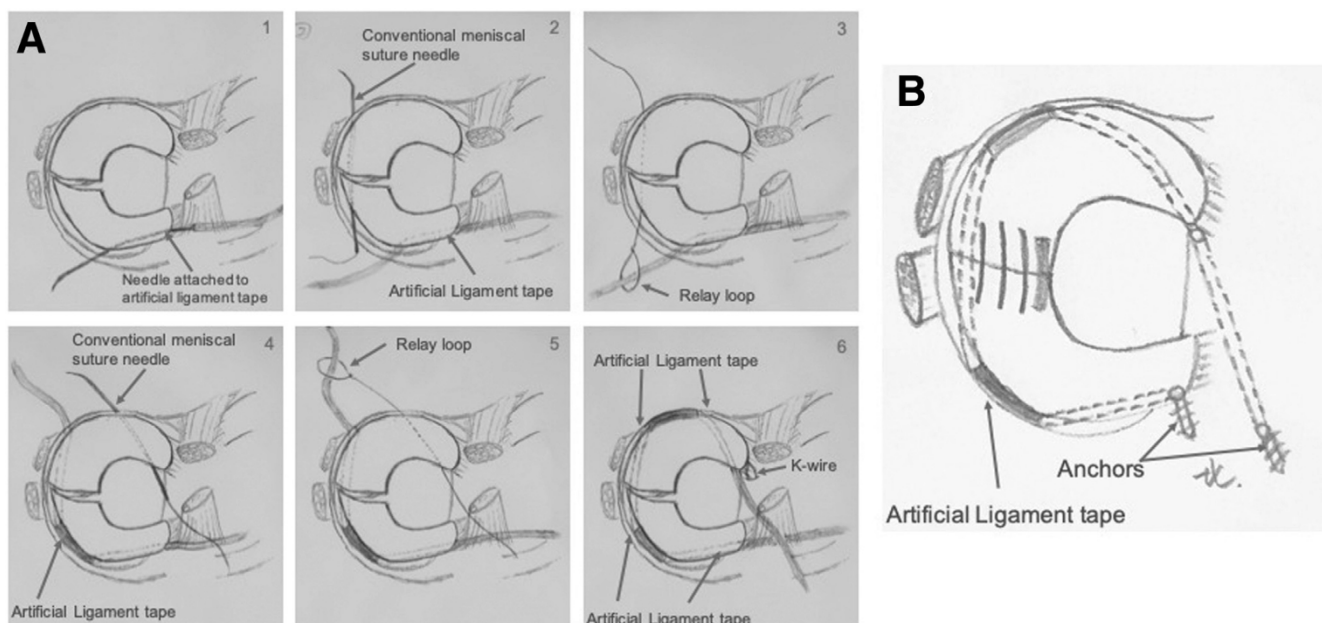


図9 この手技の模式図。人工靭帯テープの針を半月板外縁の前角から莢膜の前外側まで通す (A1)。従来のHenning半月板縫合系を取り付けた長い針を、莢膜の前外側から後外側に挿入する (A2)。人工靭帯テープは、縫合系のリレーによって半月板の中間部を通って前外側から後外側の被膜に渡される (A3)。従来のHenning半月板縫合系を半月板後角の下に挿入し、後外側被膜に入れる (A4)。人工靭帯テープを後側被膜から半月板後角に通す (A5)。2.4mmのKワイヤーで開けたドリル穴から、後角の人工靭帯テープを脛骨遠位端の前面に持ってくる (A6)。

適切な張力調整はまだ達成されていないが、半月板の断裂した切り株が適切に縮小された状態が最良であると考えている。最後に、増大術後に従来の縫合系を追加する場合、どのようなテクニックを用いるべきかは不明である。関節鏡的には、断裂部位は硬く縮小しており、断裂した半月板を安定させるには従来の水平縫合で十分であった。今後、さまざまな観点からの研究が必要である。

### 謝辞

英文校正はエディテージ ([www.editage.com](http://www.editage.com)) に感謝する。

### 参考文献

1. Fithian DC, Kelly MA, Mow VC. 半月板の材料特性と構造機能関係. *Clin Orthop Relat Res* 1990;252:19-31.
2. ヒト膝関節半月板の膠原線維組織. *Anat Embryol (Berl)* 1998;197: 317-324.
3. Bedi A, Kelly N, Baad M, Fox AJ, Ma Y, Warren RF, Maher SA. 外側半月板橈側断裂の動的接触力学: 治療への示唆. *Arthroscopy* 2012;28: 372-381.
4. Oosten J, Yoder R, DiBartola A, et al. 橈骨半月板断裂修復術において、良好な生体力学的転帰を示す手技がいくつか存在する. *Arthroscopy* 2022;38:2557-2578.
5. Henning CE. 半月板断裂の関節鏡修復術. *Orthopedics* 1983;6:1130-1132.
6. Branch EA, Milchtein C, Aspey BS, Liu W, Saliman JD, Anz AW. 半月板橈側断裂に対する関節鏡修復コンストラクトの生体力学的比較. *Am J Sports Med* 2015;43:2270-2276.
7. Buckley PS, Kemler BR, Robbins CM, et al. 内側半月板橈側断裂に対する3つの新しい修復法の生体力学的比較: 2トンネル経脛骨法、「ハイブリッド」水平・垂直マットレス縫合構成法、および複合「ハイブリッドトンネル」法. *Am J Sports Med* 2019;47:651-658.
8. Park DY, Yin XY, Chung JY, et al. Circumferential rim augmentation suture around menimeniscal capsule de crease meniscal extrusion and progression of osteoarthritis in rabbit meniscus root tear model. *Am J Sports Med* 2022;50:689-698.