

博士論文

解剖学的前十字靱帯再建術の大腿骨孔設置に関する研究
—3次元透視画像を基にしたナビゲーションによる解剖学
的設置への工夫とその術後成績および骨孔拡大について—

武富 修治

目次

要旨	5 頁
第 1 章 序文	6 頁
第 2 章 手術手技	16 頁
2-1 体位	
2-2 リファレンスフレームの装着	
2-3 3次元透視画像の取得	
2-4 ナビゲーション上での 3D モデルの作成	
2-5 移植腱採取および関節鏡	
2-6 ガイドの認識	
2-7 大腿骨用ガイドの解剖学的位置への刺入	
2-8 大腿骨孔ドリリング	
2-9 脛骨用ガイドの刺入	
2-10 脛骨孔ドリリング	
2-11 移植腱挿入および固定	
第 3 章 研究 I -1 および I -2	31 頁
3-1 目的	
3-2 方法	

a)対象

b)術式

c)後療法

d)画像評価

e)統計学的解析

3-3 結果

第4章 研究Ⅱ

40 頁

4-1 目的

4-2 方法

a)対象

b)術式

c)後療法

d)臨床成績評価項目

① 前方動揺性評価

② 回旋不安定性評価

③ 膝関節機能評価

④ 筋力評価

⑤ Lysholm score

⑥ Tegner Activity Scale

⑦ 再断裂率

e)統計学的解析

4-3 結果

第 5 章 研究Ⅲ 46 頁

5-1 目的

5-2 方法

a)対象

b)術式

c)後療法

d)画像評価

e)統計学的解析

5-3 結果

第 6 章 考察 55 頁

結論 62 頁

謝辞 63 頁

略語集 64 頁

参考文献 65 頁

要旨

大腿骨孔の解剖学的設置を目指したナビゲーションを用いた膝前十字靱帯再建術について 3 つの研究を行った。研究Ⅰでは大腿骨孔が実際に解剖学的位置に作成されているかを検証し、研究Ⅱではその臨床成績を評価した。研究Ⅲでは術後の大腿骨孔拡大について拡大率と方向を検討した。それぞれの研究では移植腱として膝屈筋腱および骨付き膝蓋腱を用い比較を行った。

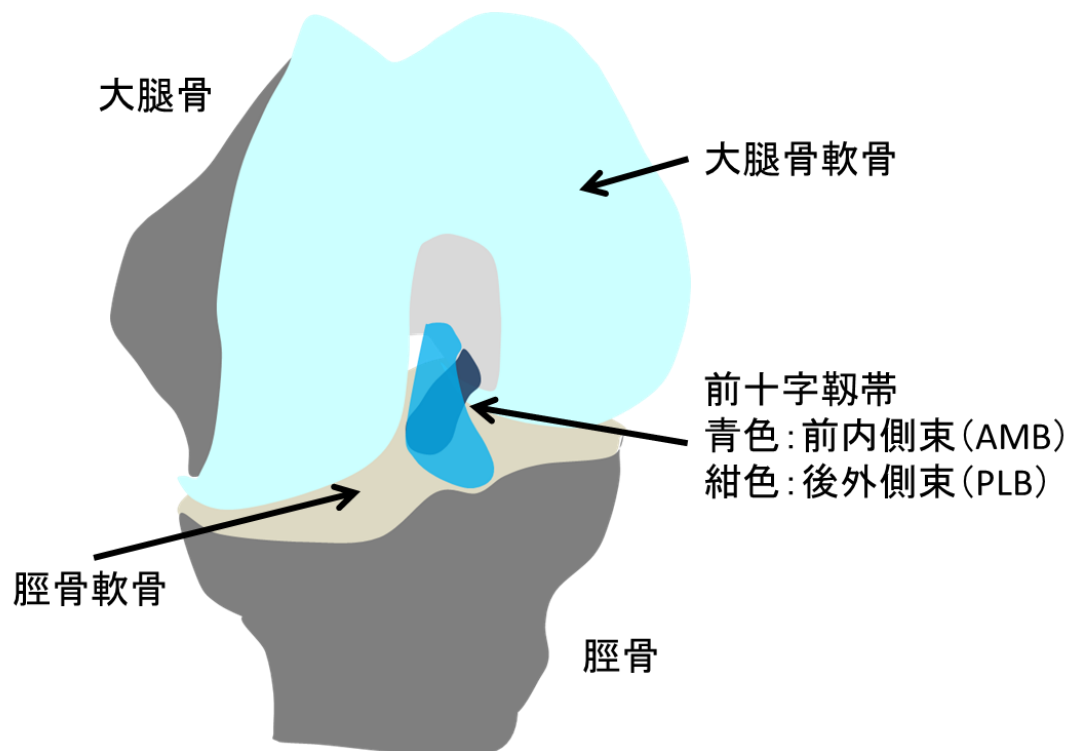
本術式において、大腿骨孔は解剖学的位置に作成され、臨床成績は良好であった。術後大腿骨孔は術後 1 年で有意に拡大し、その拡大方向は遠位前方であった。膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術における後外側束骨孔は前内側束骨孔および膝蓋腱を用いた再建術の骨孔より拡大していた。

第 1 章 序文

現代の整形外科において、スポーツ外傷の治療は重要な課題の 1 つである。中でも膝前十字靱帯（anterior cruciate ligament: ACL）損傷は、損傷によって生じる膝関節の前方回旋不安定性のため、ストップ動作や着地、方向転換時の膝くずれによりスポーツ活動が制限されるだけでなく、放置することで半月や関節軟骨の障害を併発して、膝関節機能の低下、さらに長期的には 2 次性の変形性膝関節症に至るスポーツ外傷であり^{1,2}、その治療は重要である。わが国においては大規模な疫学調査は行われていないが、ACL 損傷はスポーツ膝傷害の中で最も頻度が高く、一般人口では年間 10,000 人に約 4 人が受傷すると見積もられている³。

ACL は膝関節の大腿骨外側顆の内側壁と脛骨の顆間隆起内側とに付着する靱帯であり、多くの細い線維が束状になって靱帯を構成しているが、その構成成分は、大きく前内側束（anteromedial bundle: AMB）と後外側束（posterolateral bundle: PLB）の 2 つに分けられると考えられている⁴⁻⁶。（図 1）大腿骨側、脛骨側の付着部はともに細長い形状であり、AMB、PLB は関節内で捻じれるように走行する⁷。

図 1、左膝関節の模式図（左膝を屈曲し、前方やや内側から見た図）



前十字靱帯の構成成分である前内側束と後外側束の走行の違いがわかるように模式的に示した。

ACL 損傷の治療は、保存療法は無効なことが多く、一次的縫合術の成績も不良であるため、腱を移植する再建術が標準的な治療である。本邦では同種腱の利用ができないため、自家腱による再建術が行われている。概略として、ACL 再建術は大腿骨、脛骨それぞれに移植腱を挿入するための穴（骨孔）を作成し、大腿骨と脛骨を架橋するように、骨孔内に採取した腱を移植する術式である。移植腱の選択、骨孔作成位置・方法、大腿骨側・脛骨側の移植腱の固定方法により様々な術式が存在する。

ACL 再建術は、文献上、1917 年にはじめて Hey Groves により報告された⁸。

その術式は腸脛靱帯の筋膜を用い、大腿骨側は関節外から脛骨を架橋する術式であった。現在の ACL 再建術の移植腱のゴールドスタンダードの 1 つである骨付き膝蓋腱（bone-patellar tendon-bone : BTB）を用いた ACL 再建術は 1963 年に Jones が報告しているものの、本来の ACL の解剖とはかけ離れた非解剖学的再建術であった⁹。以後、1980 年ころまでに、O'Donoghue により腸脛靱帯¹⁰、Marshall らにより大腿四頭筋腱¹¹、Lipscomb らにより膝屈筋腱¹² など様々な移植腱を用いた ACL 再建術が考案、報告されたが、そのほとんどが関節内の靱帯である ACL を関節外に再建しているなど非解剖学的な再建であり、その成績は安定しなかった。1980 年代に入ると関節鏡技術の発達により関節内に靱帯を再建できるようになり、ACL 再建術は飛躍的に進歩した。Kurosaka らにより Interference screw が開発され¹³、BTB による関節内再建の技術が確立された。また、Rosenberg らによりエンドボタンが開発され、関節内の骨孔から挿入したボタンを大腿骨関節外出口に引き出し、骨皮質にかけることで固定できるようになった¹⁴。エンドボタンを使用すると大腿骨側に皮切を置くことなく大腿骨側の固定が出来るため、手術侵襲が少なくなり、膝屈筋腱を用いた関節内再建の大腿骨側の固定法として広く用いられた¹⁵。上記のような固定材料の開発により、2000 年ころまでに BTB および膝屈筋腱が ACL 再建術の移植腱として主流となった。一方、

Fujikawa らが報告した人工靱帯¹⁶や Shino らが報告した同種腱なども使用されていた¹⁷。

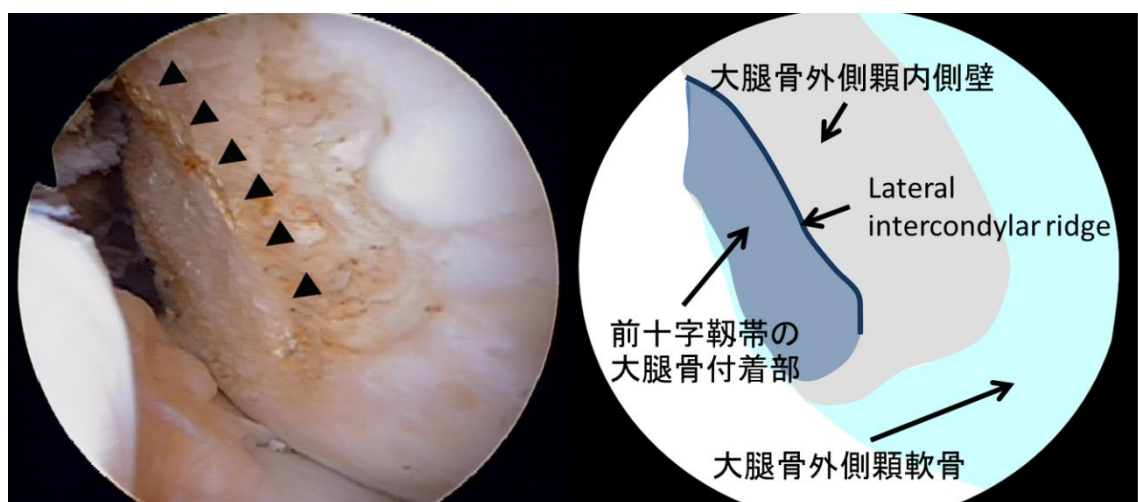
1990 年代までは BTB または膝屈筋腱を用いて、大腿骨、脛骨にそれぞれ 1 つずつ円柱状の骨孔を作成し、1 本の ACL を再建する 1 重束再建が中心であった。1 重束 ACL 再建術の成績はある程度良好であることが報告されているものの¹⁸、再建後の膝不安定性の残存や、半月損傷や軟骨損傷、さらには 2 次性の変形性関節症をきたす例も少なからず報告されている¹⁹。これは、前述のような複雑な立体構造を持つ ACL を 1 本の紐状の移植腱で再建しても、膝関節の正常なキネマティクスを再現できないためと考えられる。1990 年代から 2000 年代にかけて ACL の解剖に関する研究も広く行われるようになり、前述のような 2 本の線維束の機能や解剖が少しずつ明らかになっていった^{4,7}。このような ACL の立体構造を再建すべく、1999 年に Muneta らによって膝屈筋腱を用いた 2 重束 ACL 再建術が報告され²⁰、その後この手術法において 1 重束再建術と比較してよりよい手術成績が報告されたため、広く行われるようになっていく²¹⁻²⁵。

近年、さらに ACL の解剖学的探索が進み、特に大腿骨側では lateral intercondylar ridge (図 2) と呼ばれる骨性隆起が、ACL の大腿骨への付着の前上縁(関節鏡視)であることがわかり^{7,26-28}、ACL 再建術はより正常解剖を模倣する解剖学的再建へと移行しつつある。この lateral intercondylar ridge は小さな骨性

隆起であり、関節鏡で確認するのが困難な場合もあるが、後述のナビゲーションを使用するなどの工夫をすることで、同定しやすくなる。Shino らは、骨付き膝蓋腱を用いて lateral intercondylar ridge の後下方（関節鏡視）の解剖学的位置に長方形骨孔を作成することで解剖学的な ACL を再建する方法を考案した^{29,30}。当科では若干の改良を加え、BTB を用いた解剖学的長方形骨孔 ACL 再建術および同じく lateral intercondylar ridge を指標にした膝屈筋腱を用いた 2 重束 ACL 再建術を行っている。

近年、多くの外科分野でコンピューター支援手術（Computer-assisted surgery: CAS）が行われるようになり、スポーツ整形外科分野でも多くの手法が報告されている。ACL 再建術における CAS は主に 2 種類に分けられる。1 つは、透視画像や CT 画像を基にしたナビゲーション手術で、再現性のある正確な骨孔作成を目的とするものである³¹⁻³³。もう一つは、術前画像を用いず、術中に膝関節のキネマティクスを計測でき、膝の動きや安定性などを確認できるイメージレスナビゲーション手術である³⁴⁻³⁶。ACL 再建術におけるナビゲーションは正確な手術のためのツールとしてだけでなく、教育ツール、研究ツールとしても使用されており、ナビゲーションの使用により ACL 再建術の成績が向上したとの報告も散見される^{31,37}。

図 2、左膝関節鏡視画像（左：実際の関節鏡画像、右：左図の scheme）



大腿骨外側顆内側壁に lateral intercondylar ridge（矢頭）が観察できる。
Lateral intercondylar ridge より後下方が前十字靱帯の大腿骨付着部である。
（右図の濃い灰色部）

ACL 再建術の成績は、患者背景因子、手術因子、後療法などにより左右され
ると考えられる。我々外科医が介入できる手術因子には大腿骨孔設置位置、脛
骨孔設置位置、移植腱の選択、移植腱固定方法、移植腱固定の初期張力などが
ある。そのうち、大腿骨孔設置位置は、術中に解剖学的位置を同定することや
再現性をもって作成することが技術的に難しく、現在の ACL 再建術の成績を規

定している技術的因子として重要なものと考えられている。大腿骨孔が非解剖学的位置に設置されると回旋不安定性が生じる、あるいは隣接する後十字靱帯や顆間窩天井とインピンジ（衝突）することにより可動域制限や部分断裂が生じ、術後成績不良の原因となるが知られている³⁸。そこで当科では大腿骨孔設置位置をより正確に、再現性を持って作成することが重要と考え、大腿骨孔設置の際に 3 次元（3D）透視画像を基にしたフルオロスコピーナビゲーションを導入し³³、2005 年より先進医療（膝靱帯手術における画像支援ナビゲーション）として臨床応用を開始した。ACL 再建術の大腿骨孔作成にナビゲーションを使用し、解剖学的骨孔作成を目指す試みを行っている施設は限られており、先進医療として承認されていた施設は我々を含め、国内 3 施設のみである。開始当初は膝屈筋腱を移植腱として用いていたが、2009 年より BTB も移植腱として使用している。

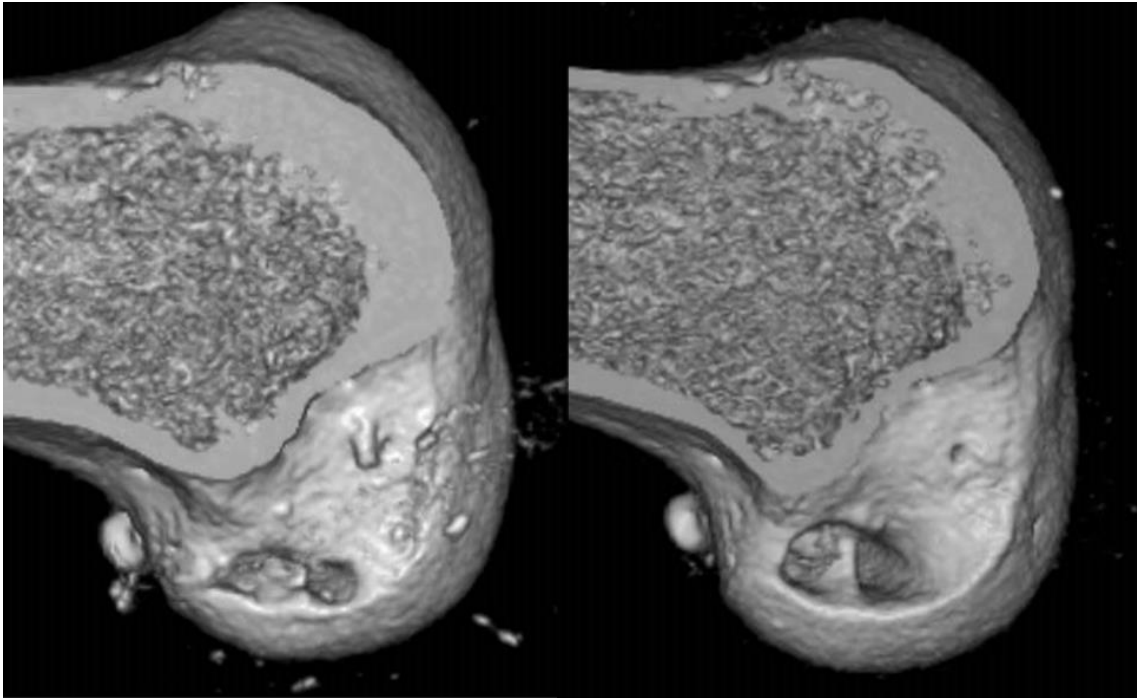
本論文では ACL 再建術における大腿骨孔設置位置に焦点を当て行った 3 つの研究について報告する。ACL の解剖をできるだけ再現し、正常に近い膝の動態を再獲得することを目指したいいわゆる“解剖学的”ACL 再建術は、広く行われているものの、実際に解剖学的に骨孔が設置できているかを検証できておらず、施設によって骨孔設置位置にもばらつきがあると考えられる。ACL 再建術の成績を議論する際に、同時に大腿骨孔設置位置を定量的に評価することができ

ば、今後、ACL 再建術における至適骨孔設置位置を明らかにしていくことができると考えている。研究Ⅰの目的は大腿骨孔を正確に作成するために3D画像を基にしたナビゲーションを用いて行ったACL再建術において、大腿骨孔が実際に解剖学的位置に作成されているかを明らかにすることであり³⁹、研究Ⅰに対する仮説は、「本ナビゲーション下に作成した大腿骨孔は解剖学的位置に設置できている」である。また研究Ⅱの目的は本ナビゲーションを使用したACL再建術後の臨床成績を明らかにすることであり²⁸、研究Ⅱに対する仮説は、「本ナビゲーション下に行った解剖学的ACL再建術の成績は良好である」である。

ACL再建術後に骨孔の拡大が起こることはよく知られている。(図3)術後の骨孔拡大は現時点では臨床成績に影響はないとされているものの、再断裂例に対する再再建術の際に障害になることが大きな問題である^{40,41}。また、より精度高く、術後膝関節の安定性などが評価できれば、骨孔拡大することで不安定性が増すということが明らかになる可能性があると考えられる。膝屈筋腱を用いた再建術では、BTBを用いた再建術と比して、より大きな骨孔拡大が生じることが報告されている⁴²⁻⁴⁵。骨孔拡大の原因は多様であり、関節液が骨孔と移植腱との間に侵入することや、骨孔と移植腱との間の微細な動きが骨孔と移植腱との癒合を阻害すること、非解剖学的な骨孔位置、早すぎるリハビリテーションなどが想定されている⁴⁶⁻⁴⁹。これまでのACL再建術後の骨孔拡大は、従来

の（非解剖学的な）再建術で議論されており、解剖学的 ACL 再建術において膝屈筋腱を用いた再建術後の骨孔拡大を BTB を用いた再建術と比較した研究はなく、骨孔拡大の頻度などは明らかになっていない。さらに臨床経験上、骨孔拡大は同心円状に生じるのではないと思われるが、実際に骨孔拡大がどの方向に起こっているかを検討した研究もこれまでない。そこで研究Ⅲでは解剖学的 ACL 再建術後の大腿骨孔拡大がどの程度、またどの方向に起こっているかを明らかにするために、術後大腿骨孔を膝屈筋腱を用いた再建術と BTB を用いた再建術間で比較した⁵⁰。研究Ⅲの仮説は「解剖学的 ACL 再建術後の骨孔拡大は BTB を用いた再建術より膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術で大きく、それぞれの骨孔拡大の方向は同心円状でなく、骨孔中心は移動している」である。本研究は解剖学的 ACL 再建術後の骨孔拡大方向に着目し、調べた初の研究である。

図 3、術後骨孔拡大



同一症例（左膝）の術後1週（左）と術後1年（右）の3次元CT像を示した。大腿骨を半割し、大腿骨外側顆を内側から観察している。2つの大腿骨孔はともに拡大しているのがわかる。

第 2 章 手術手技

研究に先立ち、3 次元透視画像を元にしたナビゲーションを用いた解剖学的前十字靱帯再建術の術式について解説する^{33,51,52}。術式は膝屈筋腱を用いた 2 重束 ACL 再建術および BTB を用いた長方形骨孔 ACL 再建術の 2 種類を行っている。前者は AMB、PLB を分けて再建するため、大腿骨、脛骨とも 2 つの独立した円形の骨孔を作成する。後者は ACL の細長い付着部を再現するために、大腿骨、脛骨とも 2 つの円をつなげた長方形（楕円）の骨孔を作成する術式である。

2-1 体位

患肢を下垂位とし、健肢は足台を用いて透視画像取得の妨げとならないように、股関節外転、膝屈曲位としておく。通常の内側ポータルより内側に作成したポータル（far anteromedial portal:FAM ポータル）⁵³より大腿骨孔を作成する場合、膝を深屈曲して大腿骨孔を作成するため、体位をとる時点で患肢の膝、股関節の深屈曲が可能であることを確認しておく。

2-2 リファレンスフレームの装着

小切開を置き、大腿骨に 2 本のハーフピンを刺入する。膝伸展位で刺入する

と、後に膝屈曲位にするときにハーフピンがたわみ、ナビゲーションに誤差を生じる可能性があるため、術中と同じ膝屈曲位で刺入する。大腿骨に平行に刺入した2本のハーフピンにリファレンスフレームを装着する。(図4) やわらかい素材のハーフピンは誤差の原因となるため、たわみにくいピンを使用する。

図4、リファレンスフレームの装着（右膝の術中写真、前外側から見ている）



大腿骨に2本のハーフピンを刺入し、リファレンスフレームを装着する。

2-3 3次元透視画像の取得

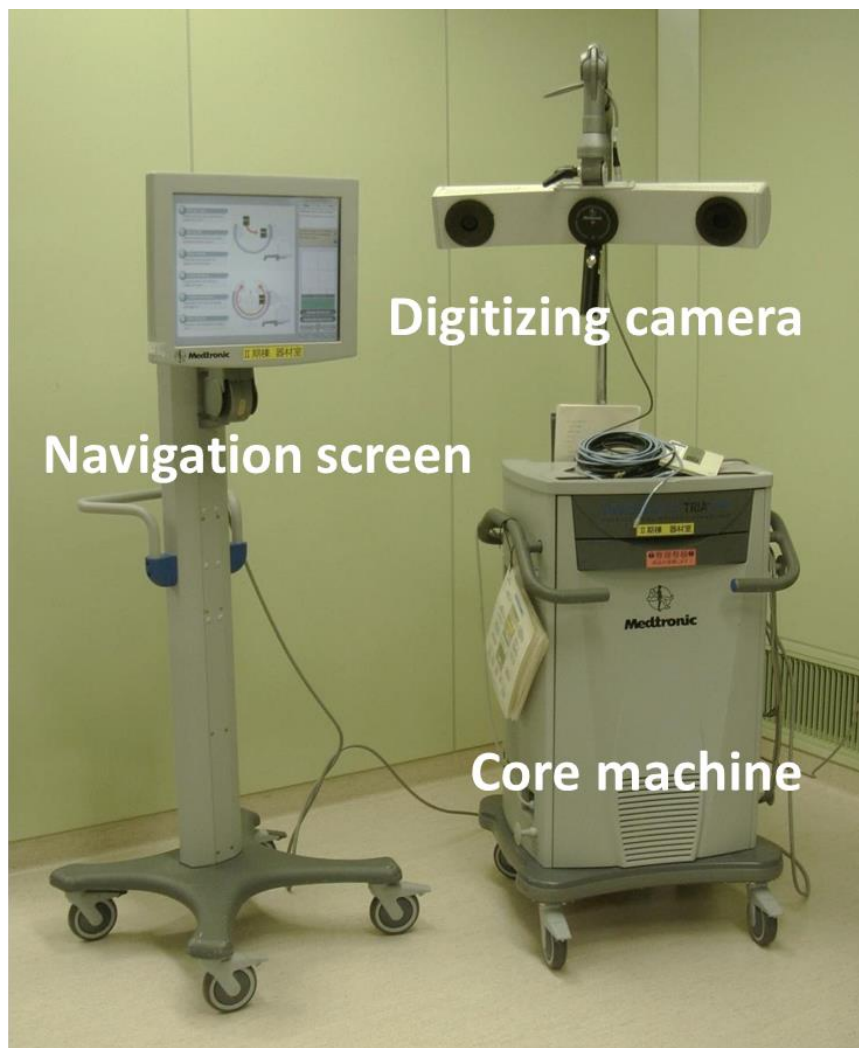
C アーム（ARCADIS Orbic 3D C-Arm : Siemens 社）（図 5）を用いて透視画像を取得し、画像データをナビゲーションシステム（StealthStation TRIA plus : Medtronic 社）（図 6）に転送する。C アームに装着したワイヤレストラッカーと大腿骨に取り付けたリファレンスフレームとをナビゲーションシステムが常に認識できる位置にセッティングする。

図 5、3次元透視画像の取得



術中に C アーム（ARCADIS Orbic 3D C-Arm : Siemens 社）を用いて 3 次元透視画像を取得する。画像取得に要する時間は 20 秒程度である。

図 6、ナビゲーションシステム

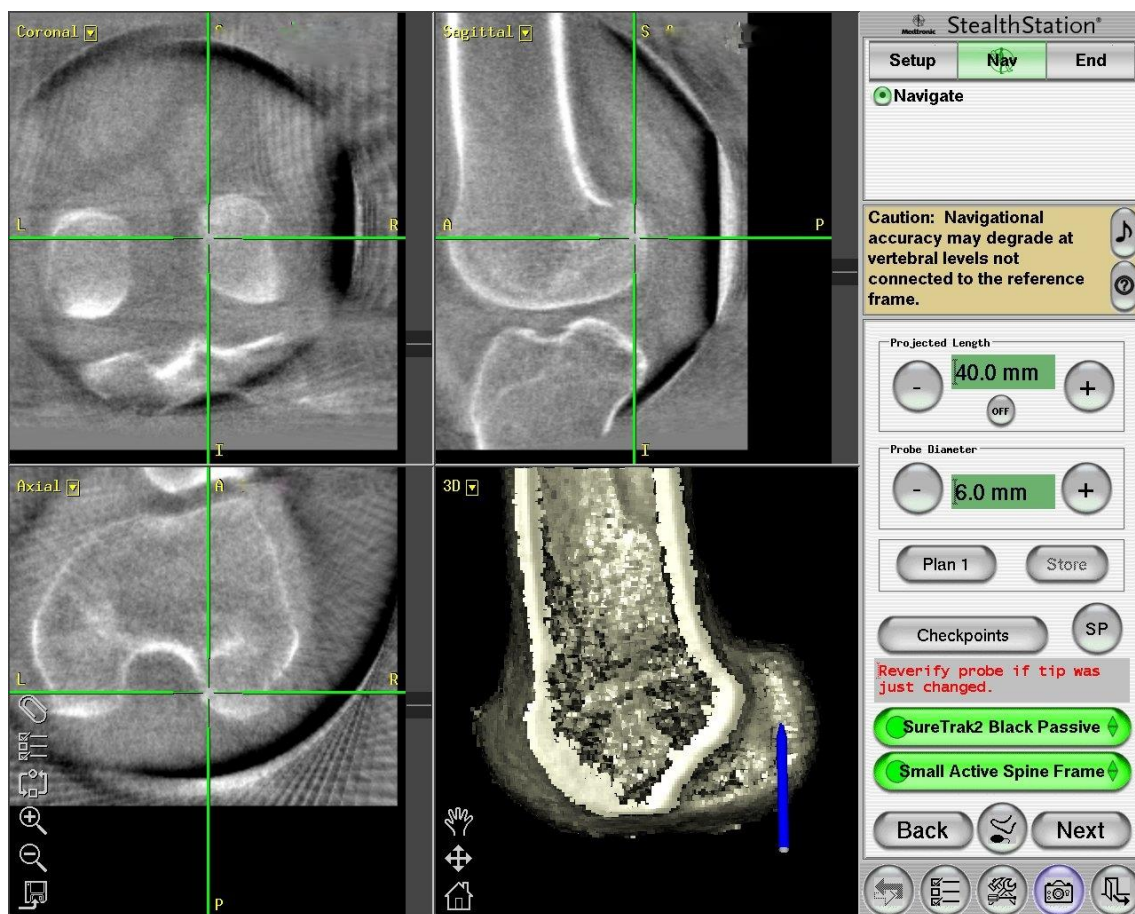


取得した画像データをナビゲーションシステム（StealthStation TRIA plus : Medtronic 社）に転送する。

2-4 ナビゲーション上での 3D モデルの作成

StealthStation の software を用いて、C アームで取得した画像データから 3D 骨モデルを作成する。その際、ACL の大腿骨付着部である大腿骨外側顆の顆間内側壁を観察できるように、膝蓋骨・大腿骨内側顆を除去しておく。再構築した 3D モデルはモニター上で自由に移動・回転させることが可能である。(図 7)

図 7、ナビゲーションモニター画像（右膝）



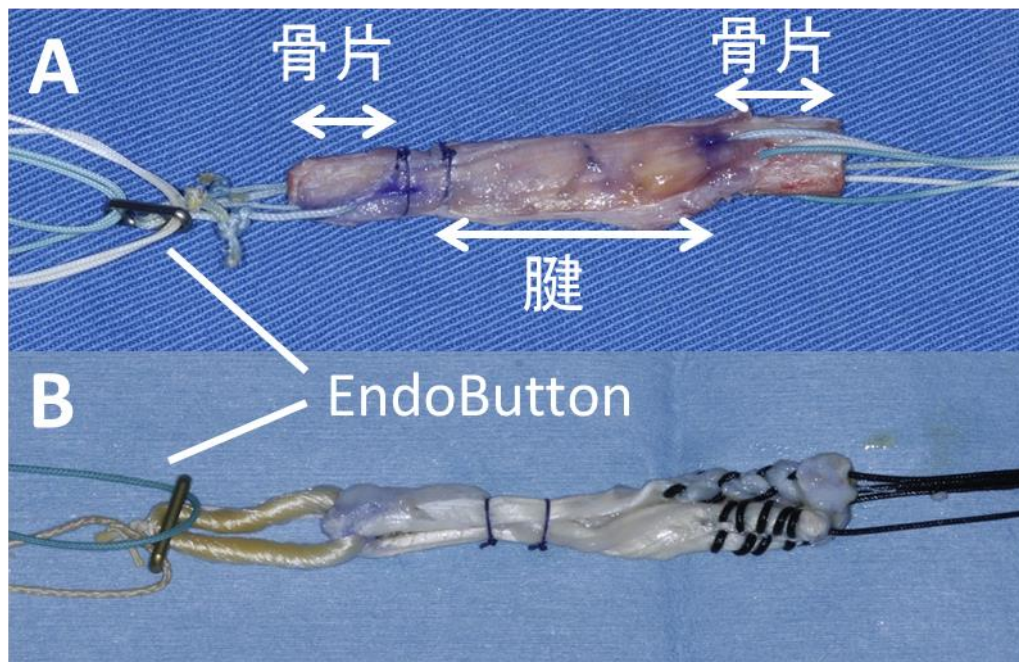
取得した 3 次元画像から 3 次元骨モデル（モニター右下）を作成する。冠状断（左上）、矢状断（右上）、軸位断（左下）の 2 次元像も同時に参照可能である。ナビゲーションにガイドを認識させることで、モニター上にガイドがリアルタイムに表示される。（右下、3 次元骨モデル上に青い矢印がガイドを示している。）

2-5 移植腱採取および関節鏡

空気止血帯使用下に移植腱を採取する。移植腱の選択は、活動性、競技特性、患者希望を考慮し、BTB または膝屈筋腱（図 8）を使用する。BTB の場合、患側膝の膝蓋腱中央を両端に骨片をつけて 10 mm 幅で採取する。骨片は片端を大腿骨側の骨孔用に厚さ 5 mm、幅 10 mm、長さ 15 mm に形成し、もう一方を脛骨

側用に長さ 15 mm の骨片が径 10 mm の骨孔に入るように形成する。膝屈筋腱の場合、まず患側膝の半腱様筋腱を採取し、径が細いようであれば同側の薄筋腱も採取する。AMB は 2～4 重、PLB は 2～3 重束とし、各束最低 5 mm 径を確保する。両端に 3 号非吸収糸で whip stitch をかけておく。大腿骨側での固定用に BTB では EndoButton (Smith & Nephew 社)、膝屈筋腱では EndoButton CL (Smith & Nephew 社) を装着しておく。関節鏡下に、断裂した ACL や他の靱帯、半月、軟骨の評価を行い、必要に応じて、靱帯再建に先立ち、半月の処置（縫合または部分切除）を行っておく。関節鏡視下に必要最小限の遺残靱帯の郭清を行い、関節鏡およびナビゲーションモニター上で ACL 大腿骨付着部の骨性の指標である lateral intercondylar ridge を確認する。（図 9A および 9B）

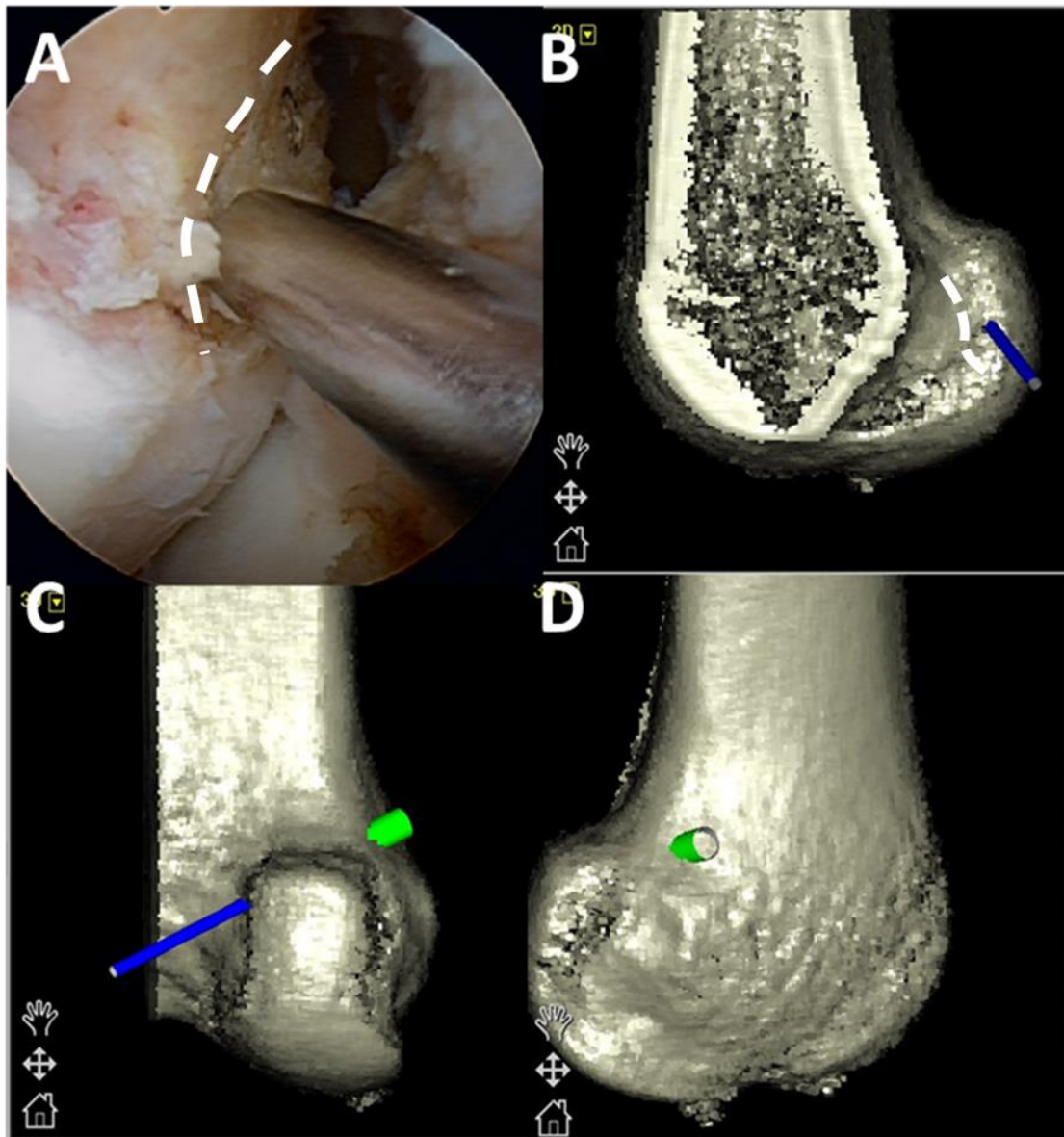
図 8、移植腱（A：骨付き膝蓋腱、B：膝屈筋腱）



A：採取した骨付き膝蓋腱に EndoButton を装着した移植腱。

B：採取した膝屈筋腱に EndoButton を装着した移植腱。同様の移植腱を2つ作成し、2重束再建術用の移植腱とする。

図 9、術中ナビゲーションによる仮想骨孔の確認（右膝）



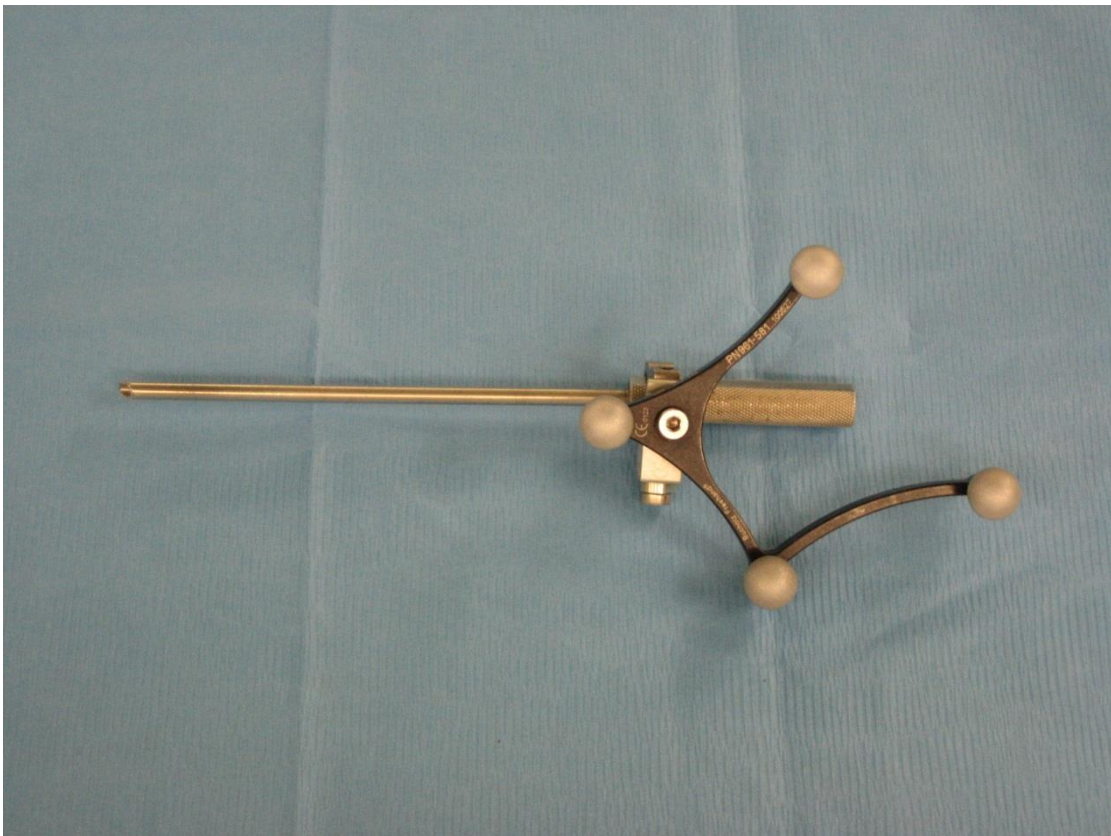
(A) 術中関節鏡下に lateral intercondylar ridge (破線) の後下方の前十字靱帯の解剖学的付着部にガイドを当てる。(B) 同時に lateral intercondylar ridge (破線) およびガイド先 (青) をナビゲーション画面上で確認できる。3次元骨モデルは任意の方向に回転可能である。(C) ガイドから延長した仮想骨孔ルート (緑) を表示させると、後方皮質穿破のリスクおよび、(D) 大腿骨外側皮質上の骨孔出口を予測可能である。

文献 28 から引用改変

2-6 ガイドの認識

ガイドピンの刺入の際に使用するガイドにマーカーを装着する。(図 10) マーカーを装着したガイドを StealthStation に認識させる。(図 11) これによりナビゲーションモニター上でガイドの位置・方向がリアルタイムに投影できるようになる。

図 10、術中使用するガイド



マーカーを装着したガイドピン刺入用のガイド

図 11、ガイドの認識



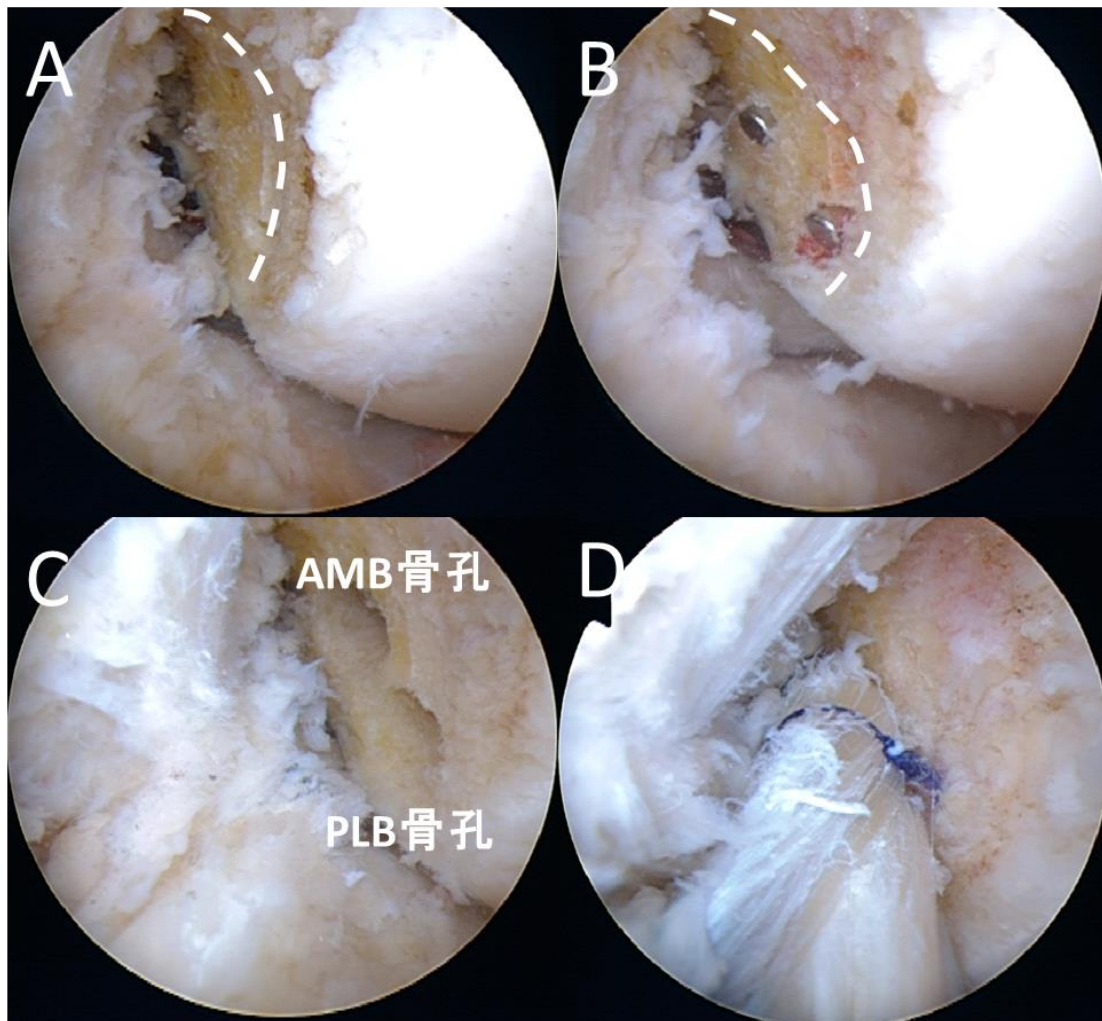
マーカを装着したガイドをリファレンスフレームに当て、Stealth Station に認識させる。

2-7 大腿骨用ガイドの解剖学的位置への刺入

大腿骨孔用のガイドの刺入は、ナビゲーション画像および関節鏡画像を同時にしながら FAM ポータルより行う。ナビゲーション上の 3D 画像上に表示された lateral intercondylar ridge とガイドの先端とを指標に刺入点を決定する。関節鏡

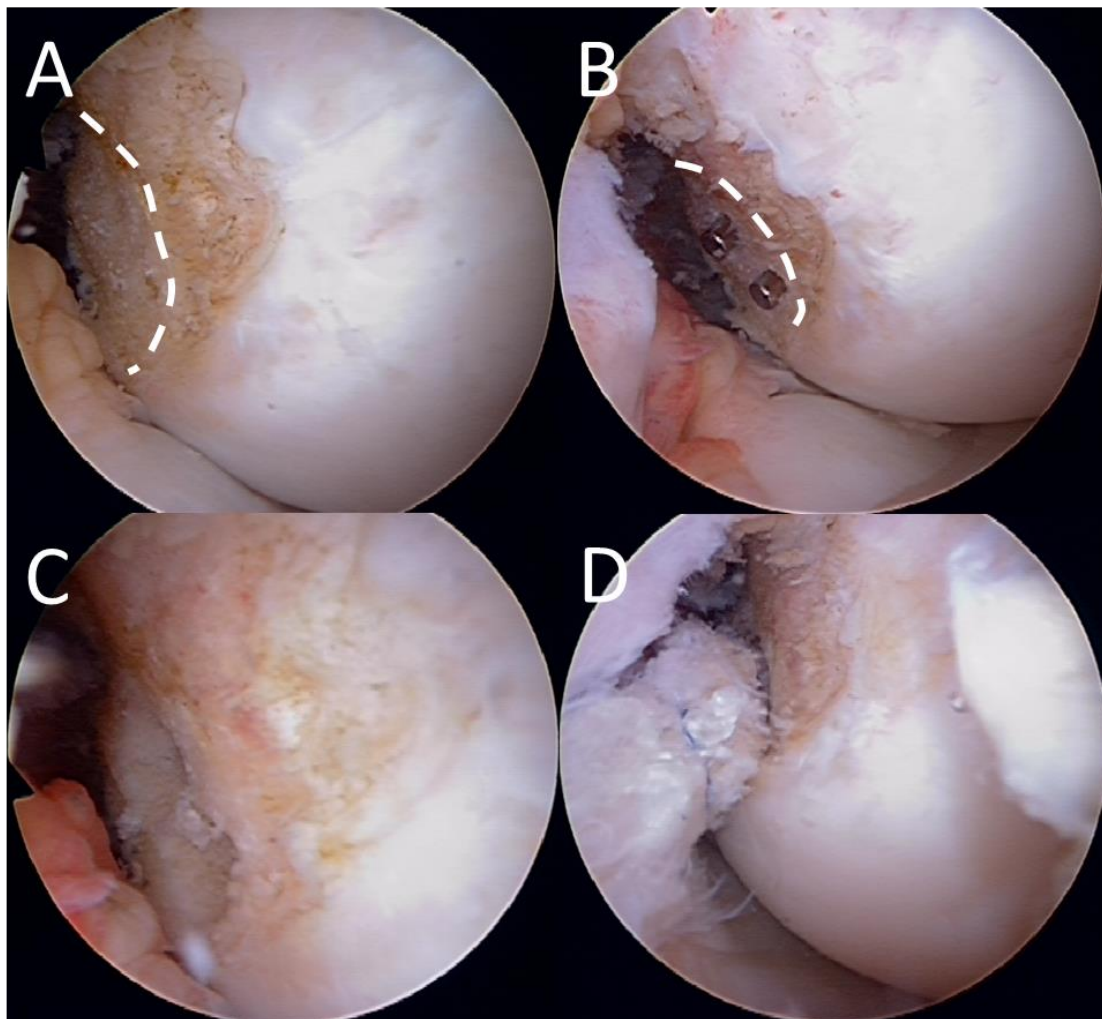
画像とあわせて、ナビゲーション上で大腿骨孔位置を決定し、ガイド先を保持したまま助手が深屈曲させ、この状態で、ナビゲーション上で仮想ルート・骨孔長をシミュレートする。仮想大腿骨孔径は 0.5 mm 刻みで設定でき、ナビゲーション画像上での仮想骨孔により、大腿骨外側の骨孔出口位置、後壁穿破のリスクが正確に評価できる。(図 9C および 9D) これによってガイド刺入の際の膝屈曲角度を微調整する。膝深屈曲位では膝蓋下脂肪体などによって関節鏡視が困難な場合があるが、その際もナビゲーションによってガイド刺入位置をいつでも確認できる。膝屈筋腱を使用した 2 重束再建術の場合、AMB、PLB の付着部の中心に、2.4 mm のガイドピンを刺入する。BTB を使用した長方形骨孔再建術の場合は、ACL の大腿骨側付着部中心に 5 mm 離して 2 本の 2.4 mm ガイドピンを平行に刺入する。(図 12 および 13)

図 12、膝屈筋腱を用いた手術の実際（左膝関節鏡視画像）



(A) 術中関節鏡下に lateral intercondylar ridge（破線）を確認し、(B) その後下方にガイドピンを2本刺入する。(C) ガイドピンをオーバードリルし、2つの独立した骨孔を作成する。(D) 脛骨骨孔作成後、2本の移植腱を骨孔に通す。

図 13、骨付き膝蓋腱を用いた手術の実際（左膝関節鏡視画像）



(A) 術中関節鏡下に lateral intercondylar ridge (破線)を確認し、(B) その後下方に平行にガイドピンを 2 本刺入する。(C) ガイドピンをオーバードリルし、2 つの骨孔を作成し、骨孔を癒合させて、長方形骨孔に形成する。(D) 脛骨骨孔作成後、2 本の移植腱を骨孔に通す。

2-8 大腿骨孔ドリリング

刺入したガイドピンに沿ってドリリングを行い、大腿骨孔を掘削する。この際、ナビゲーションモニター上で骨孔長の予測ができるため安全に骨孔の掘削が可能である。2 重束再建の際は移植腱の径に合わせたドリルで、BTB を用いた再建術の際は 5mm のドリルで overdrill した後、2 つの骨孔を、ダイレーター (Smith & Nephew 社) を用いて結合させる。(図 12 および 13)

2-9 脛骨用ガイドの刺入

関節鏡下に脛骨ガイドを用いて脛骨孔作成用のガイドピンを刺入する。膝屈筋腱を使用した 2 重束再建術の場合、AMB、PLB の付着部の中心に、2.4 mm のガイドピンを刺入する。BTB を使用した長方形骨孔再建術の場合は、ACL の脛骨側付着部中心に 1 本の 2.4 mm ガイドピンを刺入後、関節外から 10 mm のドリルで 25～30 mm 掘削したのち、平行ガイド (Smith & Nephew 社) を用いて、先ほど刺入したガイドピンの前後に 2 本の 2.4 mm ガイドピンを平行に刺入する。

2-10 脛骨孔ドリリング

刺入したガイドピンを overdrill し、大腿骨孔を掘削する。この際、2 重束再建においては移植腱の径に合わせて、BTB を用いた再建術では 5 mm のドリルで掘

削する。BTB の場合、掘削した 2 つの骨孔を、ダイレーター (Smith & Nephew 社) を用いて結合させる。

2-11 移植腱挿入および固定

加工した移植腱を挿入し、脛骨に刺入したポストスクリューに膝伸展位で固定する。(図 12 および 13)

第3章 研究 I -1 および I -2

3-1 目的

本研究の目的は 3D 透視画像を基にしたナビゲーションガイド下に行った膝屈筋腱、BTB を用いた ACL 再建術の大腿骨孔が、解剖学的に作成できているかを 3D computed tomography (CT) を用いて明らかにすることである。

3-2 方法

a)対象

研究 I -1 : 2008 年 8 月から 2010 年 9 月の間に膝屈筋腱を用いた解剖学的 2 重束 ACL 再建術を行い、術後最短 2 年の経過観察が可能であった 47 例のうち、以下の除外基準を除いた 34 例である。除外基準は、①同側の膝靭帯手術歴があるものの、②同側の膝関節周囲骨折の既往があるもの、③ACL と同時に他の靭帯再建を行ったもの、④膝関節の後方または内外反不安定性があるもの、とした。症例の背景を表 1 に示す。

表 1、患者背景（研究 I -1）

症例数	34
性別 (女性/男性)	10/24
年齢 (歳)	31 (16–63)
身長 (cm)	169 ± 9
体重 (kg)	67 ± 16
Body mass index (kg/m ²)	23.1 ± 3.8
Tegner activity scale	6 (5–9)

データは平均 ± 標準偏差または中央値（最小値–最大値）
文献 28 から引用改変

研究 I -2： 2009 年 7 月から 2011 年 7 月の間に BTB を用いた解剖学的長方形骨孔 ACL 再建術を行った 25 例のうち、以下の除外基準を除いた 20 例である。除外基準は、①同側の膝靭帯手術歴があるもの、②同側の膝関節周囲骨折の既往があるもの、③ACL と同時に他の靭帯再建を行ったもの、④膝関節の後方または内外反不安定性があるもの、とした。症例の背景を表 2 に示す。

すべての対象患者および家族（患者が未成年の場合）は、データ、画像が研究に使用され、公表されることに書面で同意している。

表 2、患者背景（研究 I -2）

症例数	20
性別 (女性/男性)	1/19
年齢 (歳)	20 (16–37)
身長 (cm)	170 ± 5
体重 (kg)	71 ± 15
Body mass index (kg/m ²)	24.0 ± 4.4
Tegner activity scale	7 (5–9)

データは平均 ± 標準偏差または中央値（最小値–最大値）

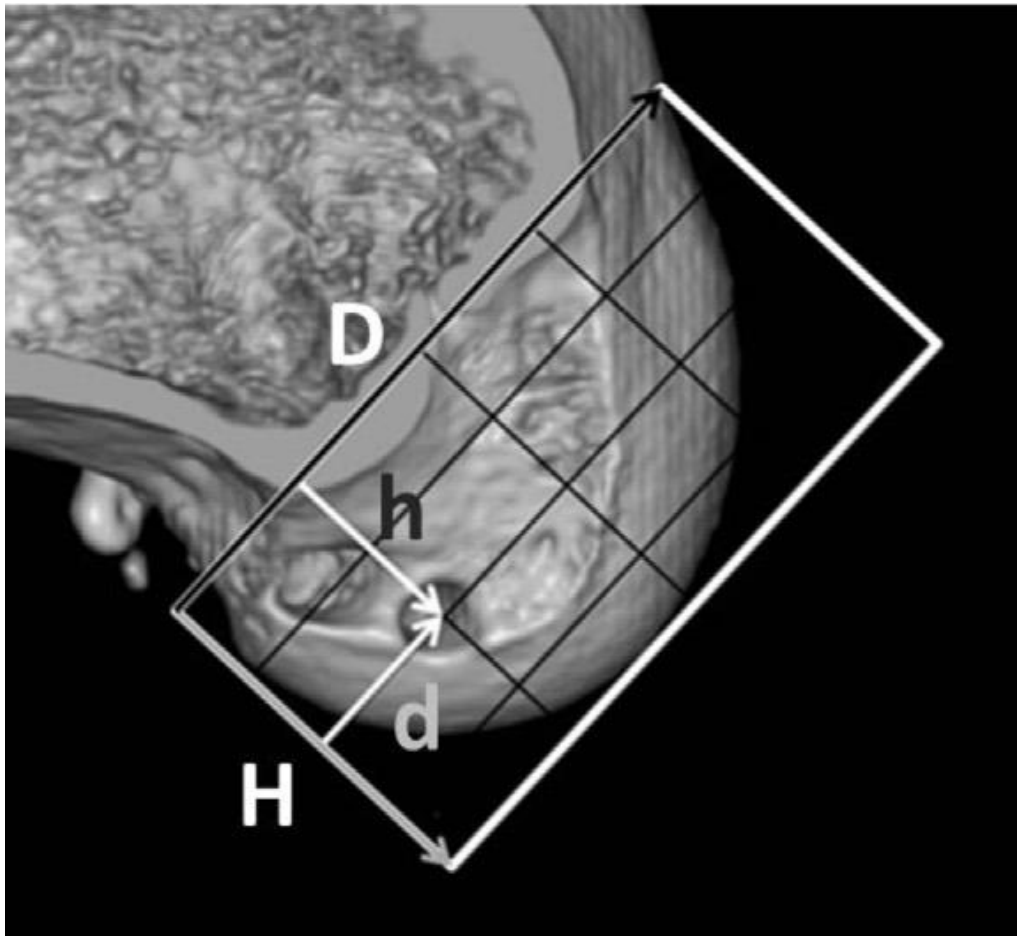
b)術式：第 2 章で示した術式で手術を行った。

c)後療法：術翌日より膝関節の可動域訓練を開始、部分荷重を 2 日後から開始し、1 週で全荷重開始した。術後 5 週間は膝硬性装具を用いて膝関節を保護、術後 4 ヶ月よりジョギングを開始、術後 8～9 ヶ月で術前のスポーツ活動に復帰とした。

d)画像評価：術後 1 週で高速ヘリカル CT (AquilionTM64 または Aquilion ONETM : 東芝メディカルシステム社) を用いて画像を取得し、画像解析ソフト (ZIOSTATION : Ziosoft 社) を用い 3D 画像に再構築した。ソフト上で脛骨と膝蓋骨を除去したのち、大腿骨を縦割し、内側半分を消去した画像を得た。この

3D モデルを用いて、大腿骨顆間窩外側壁を内側から観察することが可能となった。この 3D モデル上に Bernard らが提唱した Quadrant 法を用いて座標系を設定した⁵⁴。膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術では円に近似した AMB 骨孔、PLB 骨孔中心を、BTB を用いた長方形骨孔再建術では楕円に近似した大腿骨孔中心位置を $d/D\%$ (Blumensaat 線方向 (水平方向))、 $h/H\%$ (Blumensaat 線との垂線方向 (垂直方向)) と定量的に評価した。(図 14 および 15)

図 14、Quadrant 法による膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術における
大腿骨孔位置の画像解析



D: Blumensaat 線に沿った水平方向の最大径

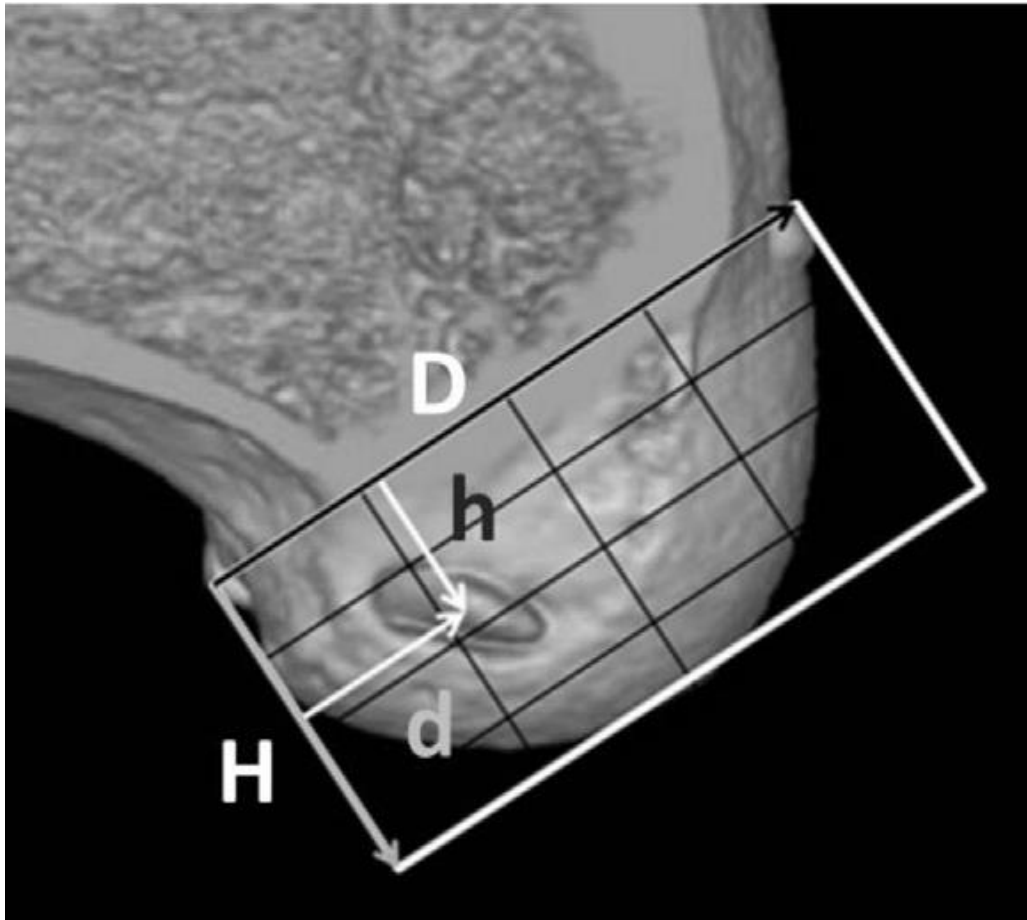
H: Blumensaat 線に垂直方向の顆間窩の高さ

d: 後方皮質から骨孔中心までの水平方向の距離

h: Blumensaat 線から骨孔中心までの垂直方向の距離

文献 39 から引用改変

図 15、Quadrant 法による BTB を用いた再建術における
大腿骨孔位置の画像解析



D: Blumensaat 線に沿った水平方向の最大径

H: Blumensaat 線に垂直方向の顆間窩の高さ

d: 後方皮質から骨孔中心までの水平方向の距離

h: Blumensaat 線から骨孔中心までの垂直方向の距離

文献 39 から引用改変

e)統計学的解析

EXCEL 統計 2012 (SSRI 社) を使い、患者背景は t 検定、マンホイットニーU 検定を用い検定を行い、画像解析では平均、標準偏差を算出した。

3-3 結果

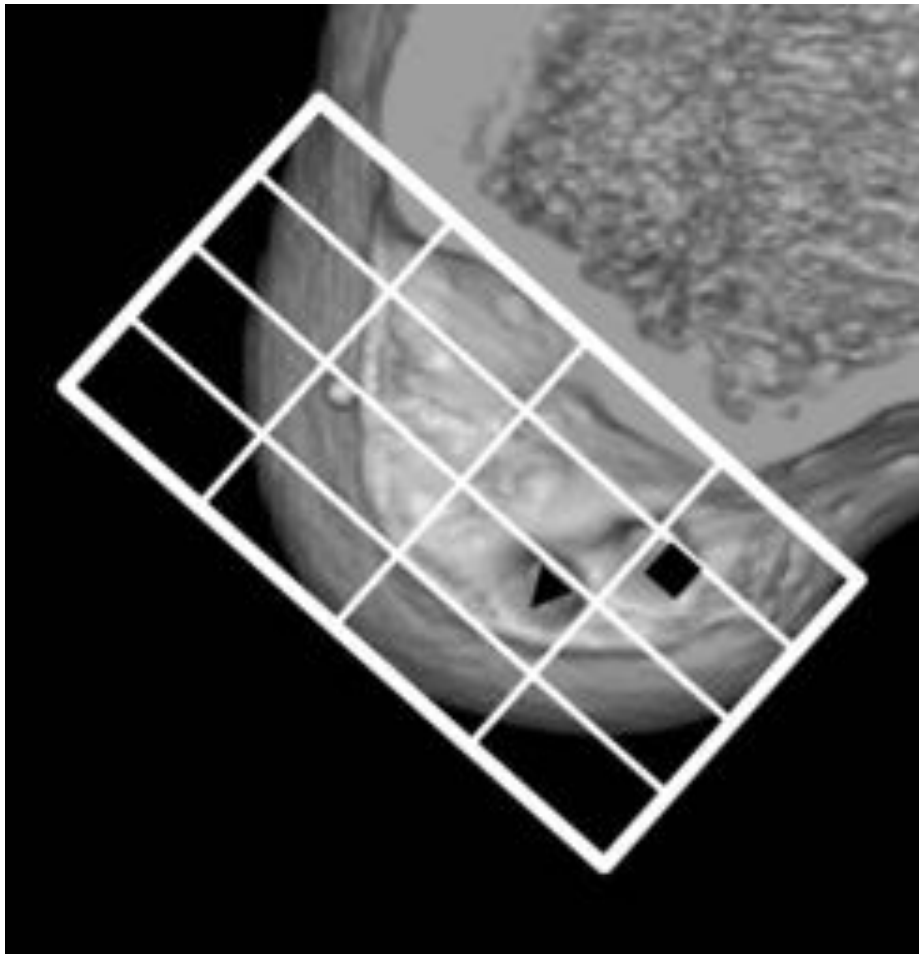
研究 I -1 : AMB 骨孔中心位置は水平方向に後方より平均 $21.0\% \pm 4.1\%$ 、垂直方向に Blumensaat 線より平均 $30.5\% \pm 9.3\%$ 、PLB 骨孔中心位置は水平方向に後方より平均 $31.3\% \pm 5.8\%$ 、垂直方向に Blumensaat 線より平均 $57.2\% \pm 7.7\%$ であった。(表 3、図 16)

表 3、研究 I -1 結果と文献上の解剖学的位置

	AM骨孔中心		PL骨孔中心	
	d/D (%)	h/H (%)	d/D (%)	h/H (%)
本研究のデータ	21.0 ± 4.1	30.5 ± 9.3	31.3 ± 5.8	57.2 ± 7.7
<i>Cadaveric study (Forsythe et al. 2010)</i>	21.7 ± 2.5	33.2 ± 5.6	35.1 ± 3.5	55.3 ± 5.3
<i>Cadaveric study (Iriuchishima et al. 2010)</i>	15 ± 6	26 ± 8	32 ± 9	52 ± 5
<i>Cadaveric study (Zantop et al. 2008)</i>	18.5	22.3	29.3	53.6

データは平均 \pm 標準偏差
文献 28 から引用改変

図 16、研究 I -1 結果



Quadrant 法を用いた平均骨孔中心位置を 3 次元 CT 上にプロットした。

■：前内側束骨孔中心

▲：後外側骨孔中心

文献 28 から引用改変

研究 I -2：骨孔中心位置は水平方向に後方より平均 $26.6\% \pm 4.4\%$ 、垂直方向に

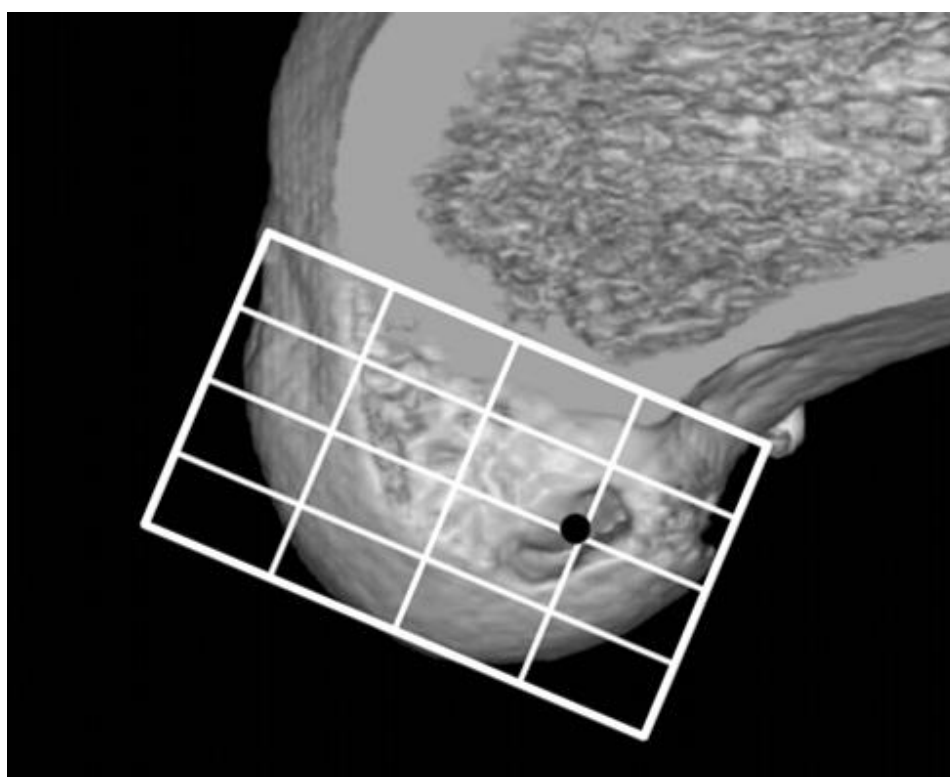
Blumensaat 線より平均 $48.1\% \pm 6.0\%$ であった。(表 4、図 17)

表 4、研究 I -2 結果と文献上の解剖学的位置

	d/D (%)	h/H (%)
本研究のデータ	26.6 ± 4.4	48.1 ± 6.0
<i>Cadaveric study (Forsythe et al. 2010)</i>	28.4	44.3
<i>Cadaveric study (Iriuchishima et al. 2010)</i>	24	39
<i>Cadaveric study (Zantop et al. 2008)</i>	23.9	38.0

データは平均 ± 標準偏差
各文献から大腿骨孔付着部中心を計算して算出した。

図 17、研究 I -2 結果



Quadrant 法を用いた平均骨孔中心位置を 3 次元 CT 上にプロットした。

● : 骨孔中心

第4章 研究Ⅱ

4-1 目的

本研究の目的は 3D 透視画像を基にしたナビゲーションガイド下に行った膝屈筋腱、BTB を用いた ACL 再建術後の臨床成績を明らかにすることである。

4-2 方法

a)対象:2007 年 7 月から 2011 年 8 月に ACL 単独再建術を行った 145 例のうち、以下の除外基準を除いた 100 例である。このうち膝屈筋腱を用いた 2 重束 ACL 再建術(DBR)を行った群は 83 例、BTB を用いた長方形骨孔 ACL 再建術(BTBR)を行った群は 17 例である。除外基準は、①同側の膝靱帯手術歴があるもの、②対側の靱帯再建または損傷の既往のあるもの、③ACL と同時に他の靱帯再建を行ったもの、④膝関節の後方または内外反不安定性があるもの、⑤追跡期間が術後 1 年未満のもの、とした。症例の背景を表 5 に示す。

すべての対象患者および家族（患者が未成年の場合）は、データ、画像が研究に使用され、公表されることに書面で同意している。

表 5、患者背景（研究Ⅱ）

	DBR	BTBR	p値
症例数	83	17	
性別 (女性/男性)	32/51	0/17	0.002*
年齢 (歳)	32 (14–63)	25 (18–33)	0.008*
身長 (cm)	168 ± 8	171 ± 5	0.15
体重 (kg)	64 ± 13	71 ± 16	0.05
Body mass index (kg/m ²)	22.7 ± 3.3	24.1 ± 4.7	0.14
Tegner activity scale	7 (3–9)	7 (5–9)	0.11

DBR：膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術

BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

データは平均 ± 標準偏差または中央値（最小値–最大値）

*p<0.05

b)術式：第 2 章で示した術式で手術を行った。

c)後療法：研究Ⅰと同じプロトコールで術後後療法を行った。

d)臨床成績評価項目：術後臨床成績として、以下の 7 項目を評価した。

① 前方動揺性評価：膝関節の前方動揺性の測定には KT-2000 arthrometer

(MEDmetric 社) を用い、134N の前方引き出し力を脛骨に加えた際の前方移動

距離の患健差（患側の値と健側の値の差）を定量的に評価した。

② 回旋不安定性評価：膝関節の回旋不安定性の評価は徒手検査である N-test で定性的に行い⁵⁵、negative（回旋不安定性なし）、trace（回旋不安定性わずかにあり）、positive（回旋不安定性あり）の3段階で評価した。

③ 膝関節機能評価：International Knee Documentation Committee (IKDC) Knee Examination Form 2000 による膝靱帯手術後の客観的機能評価。A：Normal、B：Nearly Normal、C：Abnormal、D：Severely Abnormal、の4段階で評価した⁵⁶。

本評価では関節水症の程度、膝関節可動域、膝関節安定性、膝関節の痛み・礫音、移植腱採取部の問題、単純 X 線所見、下肢機能テストの7項目について4段階評価を行い、最も悪い項目の段階を採用する。（膝関節の安定性のみが B で、他の項目が全て A であっても B と評価される。）

④ 筋力評価：術後1年での膝伸展筋力と屈曲筋力を Cybex®（Lumex 社）を用い測定した。60°/sec の等速性運動時の筋力を測定し、患健比（%）（患側の値の健側の値に対する比率）で表した。

⑤ Lysholm score：患者立脚型の主観的膝関節機能評価（100点満点）⁵⁷。歩行、杖の使用、膝のロッキング症状、膝くずれ症状、痛み、腫脹、階段、しゃがみ動作の8項目の質問により採点し、状態がよいと高得点となる。

⑥ Tegner Activity Scale：患者立脚型の主観的活動性評価（10点満点）。評価の目安は10点：競技スポーツ（サッカー、ラグビーなど）のプロレベル、9点：

競技スポーツ（サッカー、ラグビーなど）の地方レベル、8点：競技スポーツ（陸上、バドミントンなど）、7点：レクリエーションスポーツ（サッカーなど）または競技スポーツ（テニスなど）、6点：レクリエーションスポーツ（バドミントン、週5回程度のジョギングなど）、5点：建設など重労働またはレクリエーションスポーツ（週2回程度のジョギング）、4点：中等度の労働（トラック運転など）、3点：軽度の労働（介護など）、2点：平らでない道の歩行ができる、1点：軽度の労働（秘書など）、0点：膝の問題で病期休暇、である。

⑦ 再断裂率：術後合併症として再断裂率を評価した。

e)統計学的解析：EXCEL 統計 2012（SSRI 社）を用い、患者背景は t 検定、マンホイットニーU 検定を、評価項目①、④、⑤については t 検定を、項目②、③については χ^2 二乗検定を、項目⑥についてはマンホイットニーU 検定を、また⑦についてはフィッシャーの直接確率を用いて解析した。

4-3 結果

研究Ⅱ：KT-2000 患健差は BTBR 群 $0.3 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$ 、DBR 群 $0.8 \text{ mm} \pm 1.1 \text{ mm}$

と有意差はないものの BTBR 群で前方制動が優れている傾向があった。(p=0.085)

IKDC は BTBR 群で A:82%、B:18%、C、D:0%、DBR 群で A:67%、B:33%、C、

D は 0%、N-test 陰性率は BTBR 群 88.2%、DBR 群 86.7%、術後 1 年の筋力は伸展が健側比 BTBR 群 $84.8\% \pm 17.7\%$ 、DBR 群 $84.0\% \pm 16.7\%$ 、屈曲は BTBR 群 $95.2\% \pm 10.8\%$ 、DBR 群 $90.9\% \pm 14.4\%$ であった。Lysholm score は BTBR 群 98.2 ± 2.6 、DBR 群 97.2 ± 3.7 、Tegner Activity Scale は BTBR 群 7.0、DBR 群 6.6 であった。再断裂が DBR 群で 2 例 2% にあった。すべての項目で有意差はなかった。(表 6)

表 6、結果（研究Ⅱ）

	DBR	BTBR	P値
KT-2000 arthrometer 患健差 (mm)	0.8	0.3	0.09
N-test			
Negative	87%	88%	0.87
Trace	13%	12%	
Positive	0%	0%	
IKDC2000			
A: normal	67%	82%	0.22
B: nearly normal	33%	18%	
C: abnormal	0%	0%	
D: severely abnormal	0%	0%	
膝伸展筋力 患健比 (術後1年)	84.0%	84.6%	0.87
膝屈曲筋力 患健比 (術後1年)	90.9%	95.2%	0.27
Lysholm score	97.2	98.2	0.30
Tegner activity scale	6.6	7.0	0.21
再断裂率	2%	0%	1.00

DBR：膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術

BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

第5章 研究Ⅲ

5-1 目的

本研究の目的は膝屈筋腱、BTB を用いた解剖学的 ACL 再建術後の大腿骨孔の拡大率と拡大方向を 3D CT モデルを用いて明らかにすることである。

5-2 方法

a)対象：2009 年 7 月から 2012 年 2 月に ACL 再建術を行った 105 例のうち、以下の基準を満たした 52 例(うち DBR 群は 26 例、BTBR 群は 26 例)である。基準は、①膝屈筋腱を用いた 2 重束 ACL 再建術または BTB を用いた ACL 再建術を受けている、②同側の関節内靱帯再建や膝周囲の骨切り術の既往がない、③膝関節の後方または内外反不安定性がない、④DBR 群においては AMB 骨孔と PLB 骨孔の間に 3D CT 画像上で隔壁が存在する、とした。症例の背景を表 7 に示す。

すべての対象患者および家族（患者が未成年の場合）は、データ、画像が研究に使用され、公表されることに書面で同意している。

表 7、患者背景（研究Ⅲ）

	DBR	BTBR	P値
症例数	26	26	
性別 (女性/男性)	12/14	2/24	0.002*
年齢 (歳)	31 (18–50)	26 (16–47)	0.012*
身長 (cm)	167 ± 9	171 ± 5	0.015*
体重 (kg)	64 ± 12	70 ± 15	0.047*
Body mass index (kg/m ²)	22.8 ± 2.9	23.7 ± 4.2	0.191
Tegner activity scale	7 (3–9)	8 (5–10)	0.053

DBR：膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術

BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

データは平均±標準偏差または中央値（最小値－最大値）

*p<0.05

文献 39 から引用改変

b)術式：第 2 章で示した術式で手術を行った。

c)後療法：研究 I、II と同じプロトコールで術後後療法を行った。

d)画像評価：研究 I と同様のプロトコールで術後 1 週および 1 年で撮像した 3D CT モデルを使用した。この 3D CT モデル上に研究 I と同様に Quadrant 法を用いて座標系を設定した。

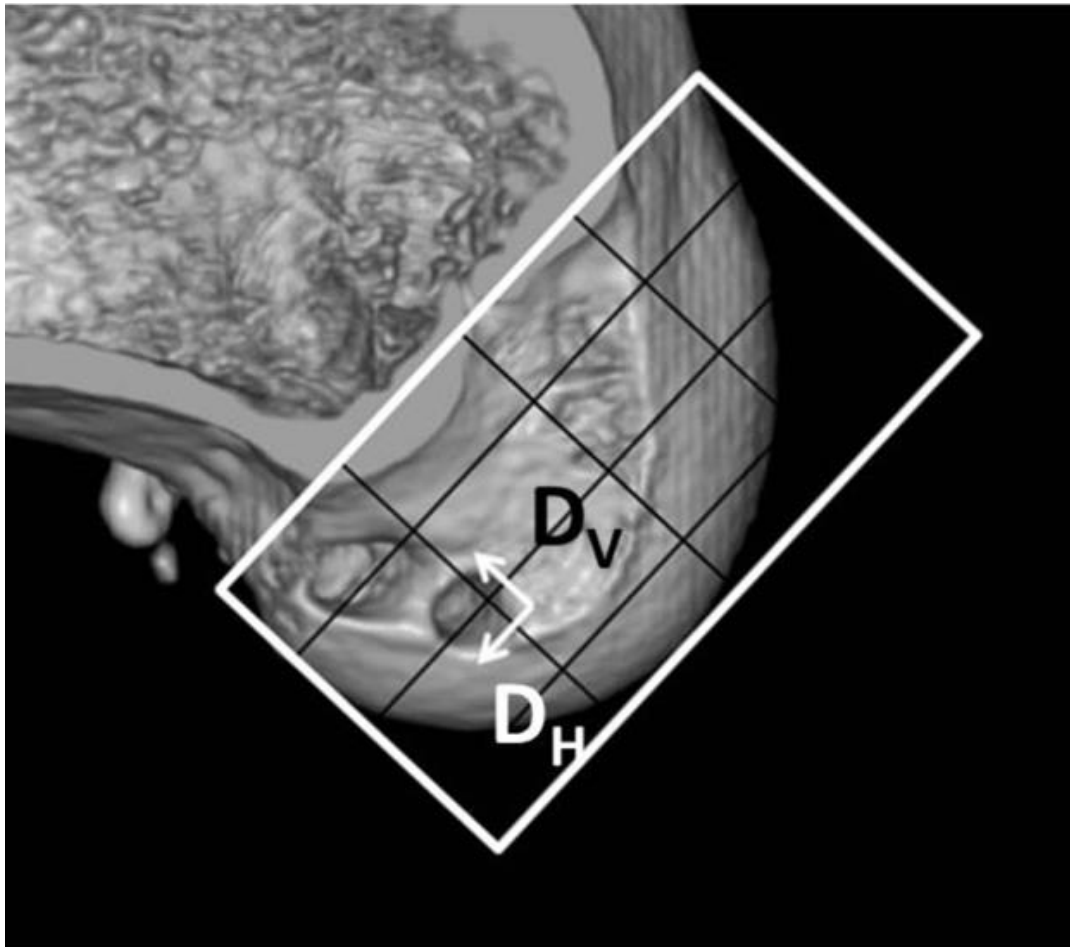
骨孔位置の評価

DBR 群では円に近似した AMB 骨孔、PLB 骨孔中心を、BTBR 群では楕円に近似した大腿骨孔中心位置を $d/D\%$ (Blumensaat 線と水平方向)、 $h/H\%$ (Blumensaat 線と垂直方向) を算出することで定量的に評価した。(図 14 および 15)

骨孔拡大率の評価

骨孔径については前述の座標上で、垂直方向の径 D_v と水平方向の D_H を測定し、術後 1 年の骨孔径を術後 1 週の骨孔径で除し、1 を引いた値を%表示し、骨孔拡大率とした。(図 18 および 19)

図 18、Quadrant 法による膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術における大腿骨孔径の測定

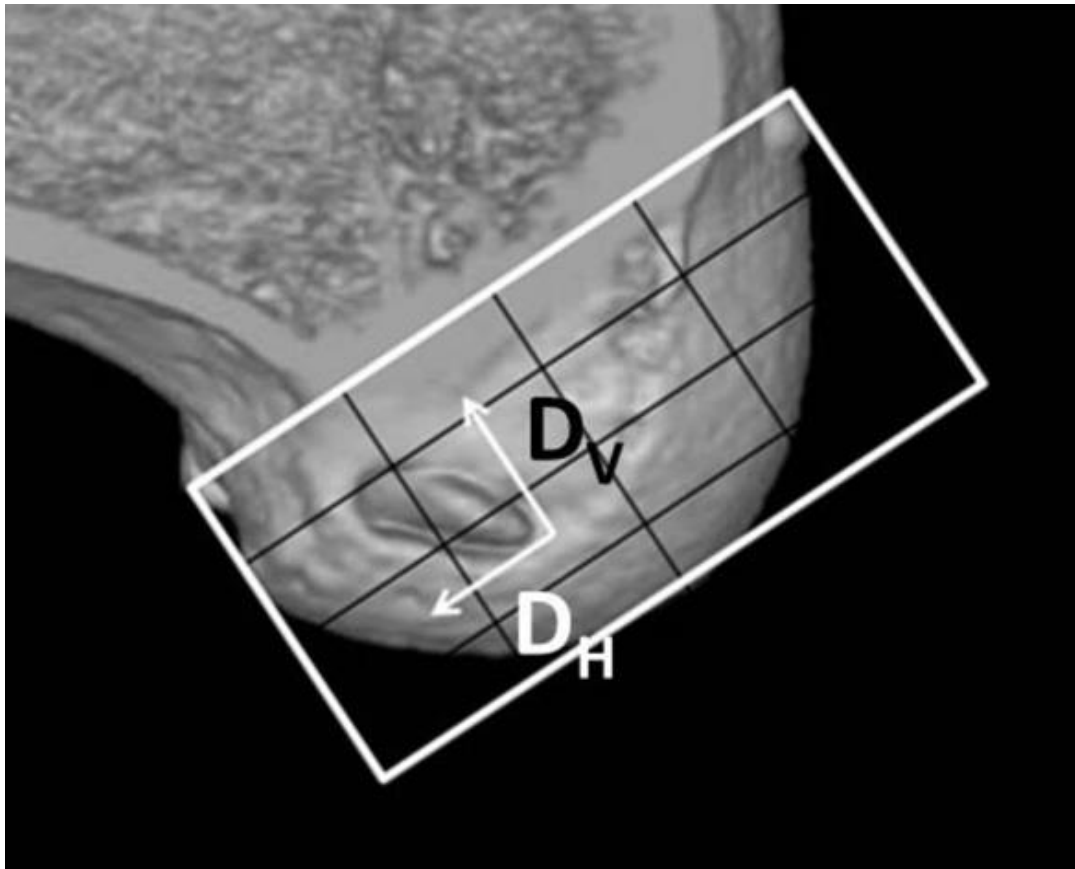


D_H: Blumensaat 線に沿った水平方向の骨孔径

D_V: Blumensaat 線に垂直方向の骨孔径

文献 39 から引用改変

図 19、Quadrant 法による骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術における大腿骨孔径の測定



D_H: Blumensaat 線に沿った水平方向の骨孔径

D_V: Blumensaat 線に垂直方向の骨孔径

文献 39 から引用改変

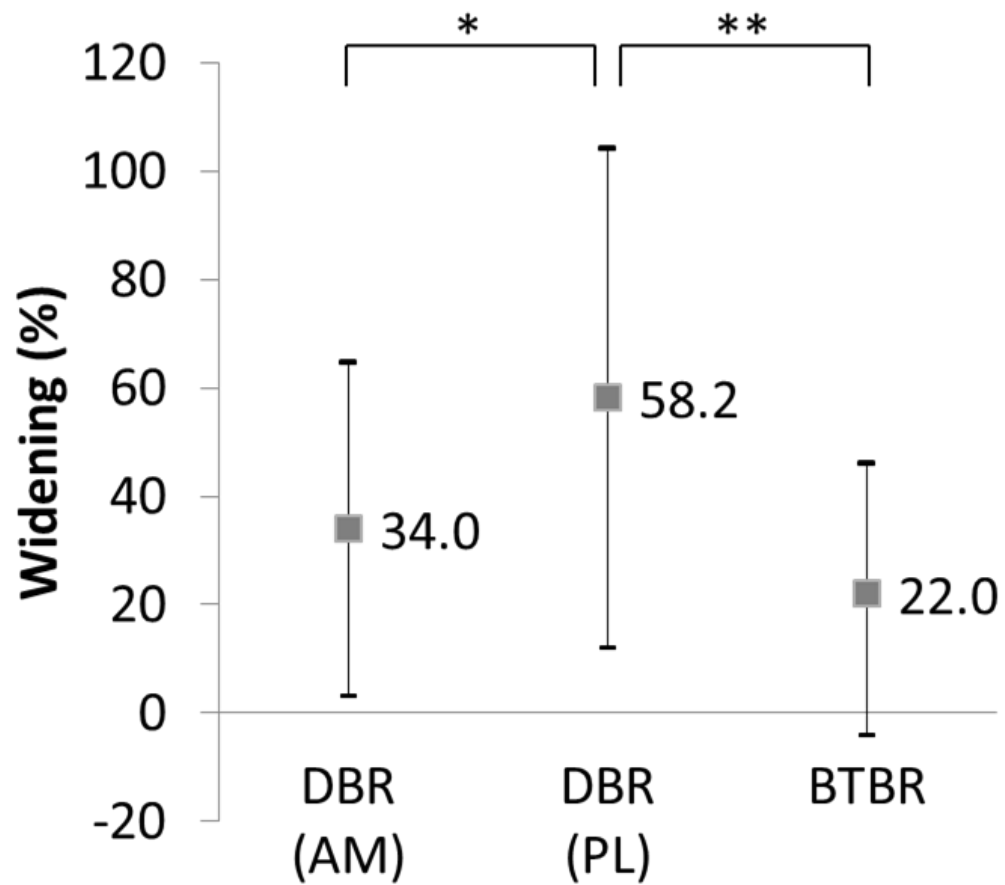
e)統計学的解析：EXCEL 統計 2012（SSRI 社）を用い、患者背景は t 検定、マン
ホイットニーU 検定を、またを、画像パラメータは t 検定を用いて解析した。

5-3 結果

骨孔拡大率

術後骨孔拡大率は DBR 群においては、AMB 骨孔が水平方向に $34.0\% \pm 30.7\%$ 、垂直方向に $28.2\% \pm 30.2\%$ 、PLB 骨孔がそれぞれ、 $58.2\% \pm 46.0\%$ 、 $73.4\% \pm 39.8\%$ であり、BTBR 群においては水平方向に $22.0\% \pm 26.1\%$ 、垂直方向に $17.1\% \pm 23.4\%$ であった。PLB 骨孔の骨孔拡大率は、AMB 骨孔および BTBR 群のそれより有意に大きかった。 $(P<0.05)$ 一方、AMB 骨孔の拡大率と BTBR 群の骨孔拡大率に有意差はなかった。 $(\text{水平方向} : P=0.14, \text{垂直方向} : P=0.15)$ (図 20 および 21)

図 20、研究Ⅲ結果：水平方向への骨孔拡大率



DBR：膝屈筋腱を用いた2重束前十字靱帯再建術

AM：前内側束骨孔

PL：後外側束骨孔

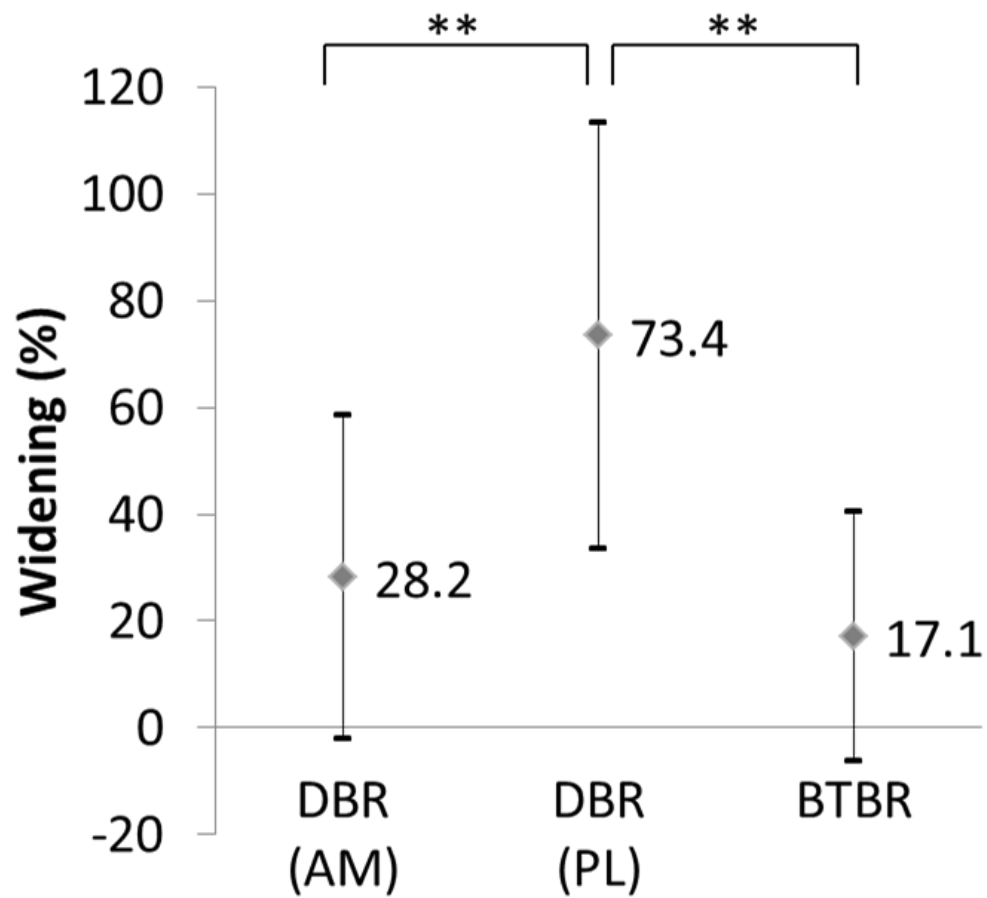
BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

* $p < 0.05$

** $p < 0.001$

文献 39 から引用改変

図 21、研究Ⅲ結果：垂直方向への骨孔拡大率



DBR：膝屈筋腱を用いた2重束前十字靱帯再建術

AM：前内側束骨孔

PL：後外側束骨孔

BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

** $p < 0.001$

文献 39 から引用改変

骨孔中心の移動

術後 1 週と術後 1 年での大腿骨孔中心の平均位置を表 8 に示した。すべてのパラメータは術後 1 週と術後 1 年で有意に変化しており、大腿骨孔中心が移動していること、つまり骨孔拡大は同心円状でなく方向性を持っていることがわかった。大腿骨孔移動方向は DBR 群における AMB 骨孔、PLB 骨孔、BTBR 群における大腿骨孔とも水平方向では遠位（関節鏡視において手前方向）、垂直方向では前方（関節鏡視では上方）であった。AMB 骨孔と PLB 骨孔の垂直方向の移動は BTBR 群の大腿骨孔のそれに対し、有意に大きかった。

表 8、研究Ⅲ結果：大腿骨孔中心位置の移動

		術後1週	術後1年	P値	骨孔中心移動	
DBR	AM	d/D(%)	21.9 ± 3.6	24.2 ± 3.4	0.004	2.3
		h/H(%)	36.2 ± 6.6	27.4 ± 8.2	< 0.001	-8.8
	PL	d/D(%)	32.9 ± 5.9	35.2 ± 4.3	0.001	2.3
		h/H(%)	61.1 ± 5.9	53.3 ± 4.6	< 0.001	-7.8
BTBR		d/D(%)	27.9 ± 5.7	31.4 ± 5.0	< 0.001	3.5
		h/H(%)	50.1 ± 7.3	47.3 ± 7.9	0.002	-2.8

DBR：膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術

AM：前内側束骨孔

PL：後外側束骨孔

BTBR：骨付き膝蓋腱を用いた長方形骨孔前十字靱帯再建術

d/D: 水平方向の位置、h/H: 垂直方向の位置（図 11 および 12 参照）

位置データは平均 ± 標準偏差

* p<0.05

文献 39 から引用改変

第 6 章 考察

研究 I の結果を、屍体膝を用いた解剖学的研究と比較してみると、表 3 および表 4 に示すように膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術、BTB を用いた長方形骨孔再建術とも、大腿骨孔はほぼ解剖学的位置に設置できていることが明らかになった⁵⁸⁻⁶⁰。術中に関節鏡視像のみならず、大腿骨の ACL 付着部全体をナビゲーションモニター像で 3D 画像として可視化することによって、再現性をもって骨孔が作成され、解剖学的な骨孔設置が可能となったと考えられる。円柱形の骨孔を大腿骨に作成する非解剖学的な従来法で作成した一重束骨孔中心の計測値は、研究 I と同様の Quadrant 法を用いた座標上で、Kopf らが、37.2% / 11.3% と報告し⁶¹、Silva らが 24% / 22% と報告している⁶²。これらのデータと本研究における大腿骨孔を比較してみると、いかに本シリーズで作成した大腿骨孔が解剖学的位置にあるかがよくわかる。(表 9)

研究 II では、解剖学的 ACL 再建術の臨床成績を移植腱別に調査したところ、BTB、膝屈筋腱を用いた術式とも、短期臨床成績は満足すべきものであった。2 群間に各調査項目では有意差はなかったものの、膝関節前方制動性で BTB を用いた術式がやや優れている傾向があり、今後、症例を積み重ねて検討する必要があると考えられた。研究 II での臨床成績を文献上の ACL 再建術後の臨床成績と比較した。膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術の成績の比較を表 10 に^{21,23,25,63,64}、

BTB を用いた ACL 再建術の成績の比較を表 11 に示す⁶⁵⁻⁶⁸。膝屈筋腱を用いた 2 重束再建術においては当科の成績は過去の報告とほぼ同様に良好であり、BTB を用いた再建術においては、過去の報告に比べて他覚的所見、自覚的所見とも優れていた。これまでの報告では骨孔設置位置は定量的に評価されていないため、骨孔位置の違いが臨床成績に影響しているかは不明である。一方 BTB を用いた再建術において当科の成績が他に比べ優れている理由としては、諸家の術式が従来の円柱形骨孔を用いた非解剖学的な再建術であるのに対し、当科での術式が Shino らの開発した、ACL の付着部内に骨孔を作成する解剖学的再建術であることと関係があると考えられた^{29,30}。今後は ACL 再建術の臨床成績を調査する際に、同時に骨孔位置を定量的に評価することで、ACL 再建術における至適骨孔位置が明らかになっていくと思われる。

表 9、研究 I -2 結果と膝蓋腱を用いた非解剖学的 1 重束再建術の大腿骨孔中心

	d/D (%)	h/H (%)
本研究のデータ	26.6 ± 4.4	48.1 ± 6.0
Kopf et al.	37.2 ± 5.5	11.3 ± 6.6
Silva et al.	24 (20–27)	22 (20–30)

データは平均 ± 標準偏差または中央値（最小値－最大値）

表 10、膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術の成績比較

	KT arthrometer 患健差	Rotational stability	Lysholm score
Kondo et al.	1.2mm (133N)	81% negative (pivot shift)	97.3
Muneta et al.	1.4mm (manual max)	85% negative (pivot shift)	94.5
Siebold et al.	1.0mm (134N)	97% negative (pivot shift)	90
Toritsuka et al.	0.9mm (manual max)	97% negative (pivot shift)	N/A
Zhao et al.	1.1mm (134N)	85% negative (pivot shift)	94.1
本研究	0.8mm (134N)	87% negative (N-test)	97.2

N/A: not available

文献 39 から引用改変

表 11、骨付き膝蓋腱を用いた前十字靱帯再建術の成績比較

	KT arthrometer 患健差	Rotational stability	Lysholm score
Bach et al.	1.0mm (manual max)	84% negative (pivot shift)	87
Otto et al.	N/A	65% negative (pivot shift)	91
Shelbourne et al.	2.0mm (manual max)	N/A	N/A
Webb et al.	2.0mm (manual max)	91% negative (pivot shift)	93
本研究	0.3mm (134N)	88% negative (N-test)	98.2

N/A: not available

研究Ⅲでは、ACL 再建術後の骨孔拡大について調査した。本研究では 3 つの重要な知見が得られた。1 つ目は、2 重束 ACL 再建術において、PLB 骨孔は AMB

骨孔に比べ、有意に拡大していたことである。2 重束再建術の骨孔拡大についての多くの先行研究では、AMB、PLB 骨孔の拡大率には違いはないとされている⁶⁹⁻⁷¹。一方、Siebold らは、本研究同様、PLB の大腿骨孔が AMB 骨孔に比べ拡大したと述べている⁷²。PLB 骨孔が AMB 骨孔よりも拡大する理由としては、膝関節の可動時に PLB の緊張変化が AMB より大きく、PLB の移植腱の骨孔内での微小な動きが、骨孔壁と移植腱の癒合時間を延長させていることが一因と考えられる^{4,73-75}。他の原因としては、AMB 骨孔は後方と近位を硬い軟骨下骨に囲まれ、さらに遠位に PLB の移植腱があるが、PLB 骨孔は後方の軟骨下骨と AMB の移植腱のみに囲まれているため、拡大スペースが多く残されていることが挙げられる。

2 つ目は、膝屈筋腱を用いた解剖学的 2 重束 ACL 再建術の大腿骨孔は、特に PLB 骨孔で、BTB を用いた解剖学的再建術に比べ大きく拡大したことである。従来の非解剖学的な膝屈筋腱を用いた 1 重束再建術では、BTB を用いた再建術より骨孔拡大が、より顕著であることが報告されているが⁴²⁻⁴⁵、解剖学的な再建術で膝屈筋腱と BTB とで比較した文献はない。本研究により lateral intercondylar ridge を指標に解剖学的付着部内に大腿骨孔を作成する術式においても、膝屈筋腱を用いた再建術では、BTB を用いた再建術よりもより大きな骨孔拡大が起こることが明らかになった。その原因としては、BTB を用いた再建術では、膝屈

筋腱に比較して骨孔壁と移植腱の癒合が早く確実に起こるため⁷⁶、骨孔壁と移植腱間の微小な動きが早期に消失するためと考えられた。

3 つ目の重要な知見は、ACL 再建術後の大腿骨孔拡大は同心円状ではなく、方向性を持っており、特に、膝屈筋腱を用いた再建術では BTB よりも大腿骨孔開口部中心が大きく移動していたということである。これまでの ACL 再建術後の骨孔拡大に関する研究は拡大率には注目していたものの、拡大の方向には注目していなかった。本研究は解剖学的 ACL 再建術後の大腿骨孔が遠位前方方向に拡大していることを明らかにした初の研究である。骨孔中心が移動しているということは、ACL 再建時に設置した移植腱は経時的に移動している可能性があるということであり、手術時に解剖学的に ACL を再建したつもりでも、再建靱帯は術後骨孔拡大により非解剖学的位置に移動してしまっているかもしれない。序文で述べた通り、骨孔拡大は現時点では術後臨床成績に影響しないとされているが、上記のような現象が起これば、術後安定性に影響する可能性は大きいとあり、今後、詳細かつ精度の高い研究を行い、術後骨孔拡大の安定性や臨床成績に対する影響を検証する必要があると考えられる。また、膝屈筋腱を使った 2 重束再建術で特に骨孔の移動が大きいことから、特に膝屈筋腱を用いた再建術における大腿骨孔作成の位置決めの際に骨孔の移動をあらかじめ考慮に入れるべきであると考えられた。

本研究で使用したナビゲーションはACL再再建術や遺残靱帯を温存したACL再建術に応用可能であり、有用性も高い。ACL再建術の増加に伴い、ACL再再建術も増加している。再再建術手術は、初回手術時の非解剖学的な骨孔、内固定材の遺残、骨孔拡大のため技術的に困難であるとされている^{77,78}。ナビゲーションを用いた本術式を行うことで、ACLの解剖学的付着部のオリエンテーションを比較的容易につけることができ、遺残した内固定材を避けて骨孔を作成することができる⁷⁹。

また、近年、遺残靱帯に存在する神経細胞による膝関節の位置覚の回復、靱帯化の促進、血管新生などに期待して、遺残ACLを温存したACL再建術が脚光を浴びている⁸⁰⁻⁸⁷。しかしながら、本術式は遺残靱帯を温存するために手術中の鏡視では解剖学的指標であるlateral intercondylar ridgeを確認しづらいため、技術的には非常に困難な術式といえる。本術式ではナビゲーションを使用することで、遺残靱帯を切除しなくてもモニター上でlateral intercondylar ridgeを確認することができるため、再現性よく適切な位置に確実に大腿骨孔を作成することができる。ACL再再建術や遺残靱帯を温存したACL再建術の分野で、本ナビゲーションが広く応用されることを期待したい。

本ナビゲーションの課題は、大腿骨に2本のピンを刺入するという侵襲があること、ナビゲーション運用による費用、患者および医療スタッフの放射線被

曝があるという点である。

本研究には限界がいくつか存在する。1つ目は研究Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとも後ろ向き研究であり、術式選択を術者が行っているため、患者選択に偏りが存在する。したがって、移植腱の違いによる臨床成績をそのまま比較してよいかどうかには疑問が残る。2つ目は臨床成績が短期成績であるため、膝靱帯再建術後の変形性膝関節症の発症率など長期予後については不明である点が挙げられる。また、本研究では ACL 再建術における大腿骨孔に注目し研究を行ったため、脛骨骨孔の位置や拡大は評価していない。今後、大腿骨同様、脛骨骨孔についても評価することが必要と考えている。

結論

3次元透視画像を基にしたナビゲーションを用いることで、骨付き膝蓋腱または膝屈筋腱を移植腱とした前十字靱帯再建術において、大腿骨孔は解剖学的位置に設置が可能であった。またこれらの解剖学的前十字靱帯再建術の臨床成績は良好であった。術後大腿骨孔は術後1年で有意に拡大し、その拡大方向は遠位前方であった。膝屈筋腱を用いた2重束再建術における後外側束骨孔の拡大は前内側束骨孔および膝蓋腱を用いた再建術の大腿骨孔より大きかった。

謝辞

本研究は、東京大学大学院医学系研究科 感覚・運動機能医学講座 整形外科学分野（整形外科学教室）において行いました。

臨床研究に従事する機会を与えて下さり、御指導、御鞭撻を賜った整形外科学教室 田中栄教授に深謝致します。

さらに、本研究の開始から御指導賜り、多くの助言を賜りました帝京大学医学部 整形外科 中川匠教授に深謝致します。

略語集

3D (3 dimensional) : 3 次元

ACL (anterior cruciate ligament) : 前十字靱帯

AM (anteromedial) : 前内側

AMB (anteromedial bundle) : 前内側束

BTB (bone-patellar tendon-bone) : 骨付き膝蓋腱

BTBR (ACL reconstruction using bone-patellar tendon-bone graft) :

骨付き膝蓋腱を用いた前十字靱帯再建術

CAS (computer assisted surgery) : コンピュータ支援手術

CT (computed tomography) : コンピュータ断層撮影

DBR (double-bundle ACL reconstruction using hamstring tendon grafts) :

膝屈筋腱を用いた 2 重束前十字靱帯再建術

PL (posterolateral) : 後外側

PLB (posterolateral bundle) : 後外側束

参考文献

1. Louboutin H, Debarge R, Richou J, Selmi TA, Donell ST, Neyret P, Dubrana F. Osteoarthritis in patients with anterior cruciate ligament rupture: a review of risk factors. *Knee* 2009;16-4:239-44.
2. Fetto JF, Marshall JL. The natural history and diagnosis of anterior cruciate ligament insufficiency. *Clin Orthop Relat Res* 1980-147:29-38.
3. 前十字靱帯（ACL）損傷診療ガイドライン 2012. 改訂第2版: 南江堂
4. Amis A, Dawkins G. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73-2:260-7.
5. Arnoczky S. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res* 1983-172:19-25.
6. Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Ménétrey J. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14-3:204-13.
7. Colombet P, Robinson J, Christel P, Franceschi J, Djian P, Bellier G, Sbihi A. Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: a cadaveric dissection and radiographic study. *Arthroscopy* 2006;22-9:984-92.

8. Hey-Groves EW. Operation for the repair of the crucial ligaments. *Lancet* 1917;190-4914:674-6.
9. Jones KG. Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am* 1963;45:925-32.
10. O'Donoghue DH. A method for replacement of the anterior cruciate ligament of the knee. *J Bone Joint Surg Am* 1963;45:905-24.
11. Marshall JL, Warren RF, Wickiewicz TL, Reider B. The anterior cruciate ligament: a technique of repair and reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 1979;143:97-106.
12. Lipscomb AB, Johnston RK, Synder RB, Brothers JC. Secondary reconstruction of anterior cruciate ligament in athletes by using the semitendinosus tendon. Preliminary report of 78 cases. *Am J Sports Med* 1979;7-2:81-4.
13. Kurosaka M, Yoshiya S, Andrish JT. A biomechanical comparison of different surgical techniques of graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 1987;15-3:225-9.
14. Chen L, Cooley V, Rosenberg T. ACL reconstruction with hamstring tendon. *Orthop Clin North Am* 2003;34-1:9-18.
15. Rosenberg TD, Deffner KT. ACL reconstruction: semitendinosus tendon is the graft of choice. *Orthopedics* 1997;20-5:396, 8.

16. Fujikawa K, Iseki F, Seedhom BB. Arthroscopy after anterior cruciate reconstruction with the Leeds-Keio ligament. *J Bone Joint Surg Br* 1989;71-4:566-70.
17. Shino K, Inoue M, Horibe S, Hamada M, Ono K. Reconstruction of the anterior cruciate ligament using allogeneic tendon. Long-term followup. *Am J Sports Med* 1990;18-5:457-65.
18. Williams Rr, Hyman J, Petrigliano F, Rozental T, Wickiewicz T. Anterior cruciate ligament reconstruction with a four-strand hamstring tendon autograft. Surgical technique. *J Bone Joint Surg Am* 2005;87 Suppl 1-Pt 1:51-66.
19. Lidén M, Sernert N, Rostgård-Christensen L, Kartus C, Ejerhed L. Osteoarthritic changes after anterior cruciate ligament reconstruction using bone-patellar tendon-bone or hamstring tendon autografts: a retrospective, 7-year radiographic and clinical follow-up study. *Arthroscopy* 2008;24-8:899-908.
20. Muneta T, Sekiya I, Yagishita K, Ogiuchi T, Yamamoto H, Shinomiya K. Two-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament using semitendinosus tendon with endobuttons: operative technique and preliminary results. *Arthroscopy* 1999;15-6:618-24.
21. Muneta T, Koga H, Mochizuki T, Ju Y, Hara K, Nimura A, Yagishita K, Sekiya I. A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate

ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques. *Arthroscopy* 2007;23-6:618-28.

22. Yagi M, Kuroda R, Nagamune K, Yoshiya S, Kurosaka M. Double-bundle ACL reconstruction can improve rotational stability. *Clin Orthop Relat Res* 2007;454:100-7.

23. Kondo E, Yasuda K, Azuma H, Tanabe Y, Yagi T. Prospective clinical comparisons of anatomic double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction procedures in 328 consecutive patients. *Am J Sports Med* 2008;36-9:1675-87.

24. Yasuda K, Kondo E, Ichiyama H, Tanabe Y, Tohyama H. Clinical evaluation of anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction procedure using hamstring tendon grafts: comparisons among 3 different procedures. *Arthroscopy* 2006;22-3:240-51.

25. Siebold R, Dehler C, Ellert T. Prospective randomized comparison of double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2008;24-2:137-45.

26. Shino K, Suzuki T, Iwahashi T, Mae T, Nakamura N, Nakata K, Nakagawa S. The resident's ridge as an arthroscopic landmark for anatomical femoral tunnel drilling in ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18-9:1164-8.

27. Iwahashi T, Shino K, Nakata K, Otsubo H, Suzuki T, Amano H, Nakamura N. Direct anterior cruciate ligament insertion to the femur assessed by histology and 3-dimensional volume-rendered computed tomography. *Arthroscopy* 2010;26-9 Suppl:S13-20.
28. Giron F, Cuomo P, Aglietti P, Bull A, Amis A. Femoral attachment of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14-3:250-6.
29. Shino K, Nakata K, Nakamura N, Toritsuka Y, Nakagawa S, Horibe S. Anatomically oriented anterior cruciate ligament reconstruction with a bone-patellar tendon-bone graft via rectangular socket and tunnel: a snug-fit and impingement-free grafting technique. *Arthroscopy* 2005;21-11:1402.
30. Shino K, Nakata K, Nakamura N, Toritsuka Y, Horibe S, Nakagawa S, Suzuki T. Rectangular tunnel double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with bone-patellar tendon-bone graft to mimic natural fiber arrangement. *Arthroscopy* 2008;24-10:1178-83.
31. Chouteau J, Benareau I, Testa R, Fessy MH, Lerat JL, Moyen B. Comparative study of knee anterior cruciate ligament reconstruction with or without fluoroscopic assistance: a prospective study of 73 cases. *Arch Orthop Trauma Surg* 2008;128-9:945-50.

32. Hiraoka H, Kuribayashi S, Fukuda A, Fukui N, Nakamura K. Endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction using a computer-assisted fluoroscopic navigation system. *J Orthop Sci* 2006;11-2:159-66.
33. Nakagawa T, Takeda H, Nakajima K, Nakayama S, Fukai A, Kachi Y, Kawano H, Miura T, Nakamura K. Intraoperative 3-dimensional imaging-based navigation-assisted anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2008;24-10:1161-7.
34. Lane CG, Warren RF, Stanford FC, Kendoff D, Pearle AD. In vivo analysis of the pivot shift phenomenon during computer navigated ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008;16-5:487-92.
35. Ishibashi Y, Tsuda E, Fukuda A, Tsukada H, Toh S. Intraoperative biomechanical evaluation of anatomic anterior cruciate ligament reconstruction using a navigation system: comparison of hamstring tendon and bone-patellar tendon-bone graft. *Am J Sports Med* 2008;36-10:1903-12.
36. Ishibashi Y, Tsuda E, Yamamoto Y, Tsukada H, Toh S. Navigation evaluation of the pivot-shift phenomenon during double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: is the posterolateral bundle more important? *Arthroscopy* 2009;25-5:488-95.
37. Meuffels DE, Reijman M, Verhaar JA. Computer-assisted surgery is not more

accurate or precise than conventional arthroscopic ACL reconstruction: a prospective randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94-17:1538-45.

38. Colvin A, Shen W, Musahl V, Fu F. Avoiding pitfalls in anatomic ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17-8:956-63.

39. Taketomi S, Inui H, Nakamura K, Hirota J, Sanada T, Masuda H, Takeda H, Tanaka S, Nakagawa T. Clinical outcome of anatomic double-bundle ACL reconstruction and 3D CT model-based validation of femoral socket aperture position. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2013.

40. Fauno P, Kaalund S. Tunnel widening after hamstring anterior cruciate ligament reconstruction is influenced by the type of graft fixation used: a prospective randomized study. *Arthroscopy* 2005;21-11:1337-41.

41. Wilson TC, Kantaras A, Atay A, Johnson DL. Tunnel enlargement after anterior cruciate ligament surgery. *Am J Sports Med* 2004;32-2:543-9.

42. Clatworthy MG, Annear P, Bulow JU, Bartlett RJ. Tunnel widening in anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective evaluation of hamstring and patella tendon grafts. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1999;7-3:138-45.

43. Webster KE, Feller JA, Hameister KA. Bone tunnel enlargement following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomised comparison of hamstring and patellar

tendon grafts with 2-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001;9-2:86-91.

44. Hersekli MA, Akpinar S, Ozalay M, Ozkoc G, Cesur N, Uysal M, Pourbagher A, Tandogan RN. Tunnel enlargement after arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: comparison of bone-patellar tendon-bone and hamstring autografts. *Adv Ther* 2004;21-2:123-31.

45. Aglietti P, Giron F, Buzzi R, Biddau F, Sasso F. Anterior cruciate ligament reconstruction: bone-patellar tendon-bone compared with double semitendinosus and gracilis tendon grafts. A prospective, randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am* 2004;86-A-10:2143-55.

46. Darabos N, Haspl M, Moser C, Darabos A, Bartolek D, Groenemeyer D. Intraarticular application of autologous conditioned serum (ACS) reduces bone tunnel widening after ACL reconstructive surgery in a randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19 Suppl 1:S36-46.

47. Baumfeld JA, Diduch DR, Rubino LJ, Hart JA, Miller MD, Barr MS, Hart JM. Tunnel widening following anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring autograft: a comparison between double cross-pin and suspensory graft fixation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008;16-12:1108-13.

48. Sabat D, Kundu K, Arora S, Kumar V. Tunnel widening after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective randomized computed tomography--based study comparing 2 different femoral fixation methods for hamstring graft. *Arthroscopy* 2011;27-6:776-83.
49. Höher J, Möller HD, Fu FH. Bone tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction: fact or fiction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1998;6-4:231-40.
50. Taketomi S, Inui H, Sanada T, Yamagami R, Tanaka S, Nakagawa T. Eccentric femoral tunnel widening in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2014;30-6:701-9.
51. 武富修治, 中川匠. 整形外科手術・私のポイント 三次元透視画像を基にしたナビゲーションを用いた解剖学的前十字靱帯再建術. 整形・災害外科 2013;56-6:760-1.
52. 中川匠, 武富修治. 三次元透視画像をもとにしたナビゲーションを用いた前十字靱帯再建術. 整形外科手術イラストレイテッド 膝関節の手術 中山書店.
53. Shino K, Horibe S, Hamada M, Nakamura N, Nakata K, Toritsuka Y, Mae T. Allograft anterior cruciate ligament reconstruction. *Techniques in Knee Surgery* 2002;1-2:78-85.

54. Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg* 1997;10-1:14-21; discussion -2.
55. Nakajima H, Kondo M, Kurosawa H, Fukubayashi T. Insufficiency of the anterior cruciate ligament. Review of our 118 cases. *Arch Orthop Trauma Surg* 1979;95-4:233-40.
56. Irrgang J, Anderson A, Boland A, Harner C, Kurosaka M, Neyret P, Richmond J, Shelborne K. Development and validation of the international knee documentation committee subjective knee form. *Am J Sports Med* 2001;29-5:600-13.
57. Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *Am J Sports Med* 1982;10-3:150-4.
58. Forsythe B, Kopf S, Wong A, Martins C, Anderst W, Tashman S, Fu F. The location of femoral and tibial tunnels in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models. *J Bone Joint Surg Am* 2010;92-6:1418-26.
59. Iriuchishima T, Ingham SJ, Tajima G, Horaguchi T, Saito A, Tokuhashi Y, Van Houten AH, Aerts MM, Fu FH. Evaluation of the tunnel placement in the anatomical double-bundle ACL reconstruction: a cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18-9:1226-31.

60. Zantop T, Wellmann M, Fu F, Petersen W. Tunnel positioning of anteromedial and posterolateral bundles in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: anatomic and radiographic findings. *Am J Sports Med* 2008;36-1:65-72.
61. Kopf S, Forsythe B, Wong A, Tashman S, Anderst W, Irrgang J, Fu F. Nonanatomic tunnel position in traditional transtibial single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction evaluated by three-dimensional computed tomography. *J Bone Joint Surg Am* 2010;92-6:1427-31.
62. Silva A, Sampaio R, Pinto E. Placement of femoral tunnel between the AM and PL bundles using a transtibial technique in single-bundle ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18-9:1245-51.
63. Toritsuka Y, Amano H, Kuwano M, Iwai T, Mae T, Ohzono K, Shino K. Outcome of double-bundle ACL reconstruction using hamstring tendons. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17-5:456-63.
64. Zhao J, Peng X, He Y, Wang J. Two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with eight-stranded hamstring tendons: four-tunnel technique. *Knee* 2006;13-1:36-41.
65. Otto D, Pinczewski LA, Clingeleffer A, Odell R. Five-year results of single-incision arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft. *Am J Sports Med* 1998;26-2:181-8.

66. Bach BR, Tradonsky S, Bojchuk J, Levy ME, Bush-Joseph CA, Khan NH. Arthroscopically assisted anterior cruciate ligament reconstruction using patellar tendon autograft. Five- to nine-year follow-up evaluation. *Am J Sports Med* 1998;26-1:20-9.
67. Webb JM, Corry IS, Clingeleffer AJ, Pinczewski LA. Endoscopic reconstruction for isolated anterior cruciate ligament rupture. *J Bone Joint Surg Br* 1998;80-2:288-94.
68. Shelbourne KD, Gray T. Anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon graft followed by accelerated rehabilitation. A two- to nine-year followup. *Am J Sports Med* 1997;25-6:786-95.
69. Järvelä T, Moisala AS, Paakkala T, Paakkala A. Tunnel enlargement after double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective, randomized study. *Arthroscopy* 2008;24-12:1349-57.
70. Lee YS, Lee SW, Nam SW, Oh WS, Sim JA, Kwak JH, Lee BK. Analysis of tunnel widening after double-bundle ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20-11:2243-50.
71. Siebold R. Observations on bone tunnel enlargement after double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2007;23-3:291-8.
72. Siebold R, Cafaltzis K. Differentiation between intraoperative and postoperative bone tunnel widening and communication in double-bundle anterior cruciate ligament

reconstruction: a prospective study. *Arthroscopy* 2010;26-8:1066-73.

73. Girgis F, Marshall J, Monajem A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clin Orthop Relat Res* 1975-106:216-31.

74. Kurosawa H, Yamakoshi K, Yasuda K, Sasaki T. Simultaneous measurement of changes in length of the cruciate ligaments during knee motion. *Clin Orthop Relat Res* 1991-265:233-40.

75. Yasuda K, Ichiyama H, Kondo E, Miyatake S, Inoue M, Tanabe Y. An in vivo biomechanical study on the tension-versus-knee flexion angle curves of 2 grafts in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: effects of initial tension and internal tibial rotation. *Arthroscopy* 2008;24-3:276-84.

76. Suzuki T, Shino K, Nakagawa S, Nakata K, Iwahashi T, Kinugasa K, Otsubo H, Yamashita T. Early integration of a bone plug in the femoral tunnel in rectangular tunnel ACL reconstruction with a bone-patellar tendon-bone graft: a prospective computed tomography analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19 Suppl 1:S29-35.

77. Shino K, Mae T, Nakamura N. Surgical technique: revision ACL reconstruction with a rectangular tunnel technique. *Clin Orthop Relat Res* 2012;470-3:843-52.

78. Kamath GV, Redfern JC, Greis PE, Burks RT. Revision anterior cruciate ligament

reconstruction. *Am J Sports Med* 2011;39-1:199-217.

79. Taketomi S, Inui H, Nakamura K, Hirota J, Takei S, Takeda H, Tanaka S, Nakagawa T. Three-dimensional fluoroscopic navigation guidance for femoral tunnel creation in revision anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc Tech* 2012;1-1:e95-9.

80. Schultz RA, Miller DC, Kerr CS, Micheli L. Mechanoreceptors in human cruciate ligaments. A histological study. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66-7:1072-6.

81. Georgoulis AD, Pappa L, Moebius U, Malamou-Mitsi V, Pappa S, Papageorgiou CO, Agnantis NJ, Soucacos PN. The presence of proprioceptive mechanoreceptors in the remnants of the ruptured ACL as a possible source of re-innervation of the ACL autograft. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001;9-6:364-8.

82. Adachi N, Ochi M, Uchio Y, Iwasa J, Ryoke K, Kuriwaka M. Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense. *Acta Orthop Scand* 2002;73-3:330-4.

83. Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, Adachi N, Sumen Y. The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* 1999;81-5:902-6.

84. Ahn J, Lee S, Choi S, Lim T. Magnetic resonance imaging evaluation of anterior cruciate ligament reconstruction using quadrupled hamstring tendon autografts:

comparison of remnant bundle preservation and standard technique. *Am J Sports Med* 2010;38-9:1768-77.

85. Ahn JH, Wang JH, Lee YS, Kim JG, Kang JH, Koh KH. Anterior cruciate ligament reconstruction using remnant preservation and a femoral tensioning technique: clinical and magnetic resonance imaging results. *Arthroscopy* 2011;27-8:1079-89.

86. Gohil S, Annear PO, Breidahl W. Anterior cruciate ligament reconstruction using autologous double hamstrings: a comparison of standard versus minimal debridement techniques using MRI to assess revascularisation. A randomised prospective study with a one-year follow-up. *J Bone Joint Surg Br* 2007;89-9:1165-71.

87. Yasuda K, Kondo E, Kitamura N, Kawaguchi Y, Kai S, Tanabe Y. A pilot study of anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with ligament remnant tissue preservation. *Arthroscopy* 2012;28-3:343-53.