

3次元 CT 再構成画像による
ヒト膝前十字靭帯大腿骨側付着部の検討
－ 膝関節鏡シミュレーション －
(要約)

日本大学大学院医学研究科博士課程
外科系整形外科学専攻

白田 智彦

修了年 2014 年

指導教員 長岡 正宏

【諸言】

近年、スポーツ人口が増加しており、膝関節靭帯損傷のため整形外科を受診する患者が増加する傾向にある。なかでも前十字靭帯（Anterior Cruciate Ligament; 以下、ACL）損傷は比較的多くみられ、コンタクトスポーツや、ジャンプや急激なストップ動作を要求される競技では損傷の機会も多い。この靭帯は、いったん損傷されれば治癒しにくく、膝くずれを生じるようになるためスポーツ活動に支障をきたしやすい。また、二次的に半月損傷を合併し、さらに放置すれば数年後には膝関節軟骨の損傷が生じ変形性関節症へと伸展する。そのため、膝靭帯損傷の中でも、手術加療の必要性が高い靭帯である。損傷した際は、保存療法や手術療法など、各種治療方法があるが、近年では、関節鏡を用いた ACL 再建術が積極的にすすめられている。ACL 再建術において大腿骨側の解剖学的位置への骨孔作成の重要性が指摘されている¹。大腿骨骨孔位置はボリュームレンダリング法による 3 次元 CT 再構成画像（以下、3DCT）によってはじめて確認することが可能であるが、臨床の現場では多くの場合、関節鏡での視野において骨孔位置を決定している。

過去の報告では、大腿骨の骨孔位置は X 線像^{2, 3} や 3DCT⁴ によって表されている。これは Bernard の報告²を基に普及したもので、Quadrant 法として知られている。それは大腿骨外顆内側壁の ACL 付着部を真正面（＝大腿骨長軸に対し真側面）から見た像であり、鏡視では 90° 鏡視像（以下、90° view）に相当する。しかし、90° view は関節鏡が大腿骨内顆に当たってしまう解剖学的制約により術中には再現できない。そのため実際の膝関節鏡視所見とは差異があり、過去の報告が関節鏡視下手術では参考にならないことが多い。

膝関節鏡シミュレーションとして、3DCT にて関節鏡手術で実際に視野を得られ用いることができる前内側ポータルからの鏡視像を想定した 30° view と、Far anteromedial ポータルからの鏡視像を想定した 45° view における、ACL 大腿骨側付着部の鏡視時の鏡視所見の差異につき検討を行った。90° view と 45° view・30° view の座標を比較することにより、関節鏡の挿入角度によっておこる、座標表示の変位を確認できると考えた。関節鏡から見た骨孔位置を再現できるよう、3DCT を用いて関節鏡視シミュレーションを行い、鏡視角度に

よる骨孔位置の相違について検討した報告例は未だない。

【目的】

実際の手術においては、理想の骨孔位置を想定して鏡視下に骨孔作成するが、想定外の骨孔位置となることがある。これは膝前方からの鏡視像と **Quadrant 法 2** での骨孔位置イメージとの間にギャップがあるためと考えられる。本研究の目的は、大腿骨外顆内側壁の ACL 付着部を解剖学的にマーキングし、靭帯付着部の観測角度（視野）の変化によっておこる位置表示の変位を、3次元 CT 再構成画像による膝関節鏡シミュレーションにより明らかにすることである。

【対象と方法】

本研究は日本大学医学部倫理委員会の承認を受け研究を行った(承認番号 24-13-0)。系統解剖用献体 6 体より 12 膝（平均年齢 82.5 歳）を対象とした。

ACL を前内側線維束（anteromedial bundle; 以下, AMB）と後外側線維束（posteromedial bundle; 以下, PMB）に分け、ACL 付着部を銅製金属糸でマーキングした。マーキングした大腿骨の 3DCT モデルを作成した。コントロール群としての 90° view に対して、前内側ポータルからの鏡視像を想定した 30° view と、Far anteromedial ポータルからの鏡視像を想定した 45° view における、ACL 大腿骨側付着部の鏡視時の鏡視所見の差異につき検討を行った。Quadrant 法では実際の関節鏡視にて確認する事が出来ない後壁の後方までが座標に含まれてしまう。本研究では関節鏡視所見をシミュレーションするため Quadrant 法を改良し、関節鏡視にて実際に見る事の出来る大腿骨外顆内側壁のみに座標を設定した。外顆内側面－後壁－大腿骨骨幹部後面の交点を 0 点と設定し、Blumensaat's line に平行な線を X 軸とし端は外顆内側面前方軟骨境界、垂直な線を Y 軸とし端は下方軟骨境界とし、各座標位置を(X, Y)(%)と表記

した。付着部の座標は AMB、PLB マーキング部の長軸と短軸の交差する点である中心点とした。定量結果は mean ± SD で表した。90° view、45° view、30° view の 3 群間比較は一元配置分散分析を用い、任意の 2 群間比較は Tukey の多重比較法を用いた。統計学的解析には、統計解析ソフト SAS version 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA) を使用した。有意水準は両側 5% を用いた。

【結果】

各座標位置を (X, Y)(%) と表記すると、AMB 中心位置は、90° view (16.2 ± 5.65, 35.5 ± 9.61)、45° view (14.5 ± 5.53, 32.9 ± 8.12)、30° view (9.10 ± 5.19, 34.9 ± 7.93)、PLB 中心位置は、90° view (31.6 ± 9.68, 67.0 ± 8.31)、45° view (31.2 ± 12.20, 64.2 ± 6.66)、30° view (21.2 ± 11.32, 66.2 ± 8.20)、であった (図 2)。統計解析の結果、一元配置分散分析にて 3 群間で有意差あったのは、%AMB (X) (p=0.008)、%PLB (X) (p=0.047) であった。また、多重比較法にて 2 群間で有意差あったのは、%AMB (X) 90° - 30° の 2 群間 (p=0.008) であった。詳細は下記のとおりである。

(1)%AMB (X)に関する結果

一元配置分散分析では 30° view、45° view、そして 90° view の 3 群間で有意差を認めた (p=0.008)。

多重比較法において 90° view と 30° view の 2 群間に有意差を認め、30° view で %AMB が低くなっており、つまり deep となっていた (p=0.008)。45° view と 30° view の 2 群間においては統計学的に有意な差を認めなかったものの、30° view で %AMB が低くなっており、同様の傾向を認めた (p=0.052)。

(2)%AMB (Y)に関する結果

一元配置分散分析では 3 群間で有意差を認めなかった (p=0.743)。

多重比較法においても 30° view, 45° view, そして 90° view の各 2 群間で有意差を認めなかった。

(3)%PLB (X)に関する結果

一元配置分散分析では 30° view、45° view、そして 90° view の 3 群間で有

意差を認めた($p=0.047$)。

多重比較法において 90° view と 30° view の 2 群間では統計学的に有意な差はなかったものの、 30° view で %PLB(X)は低い、つまり deep となる傾向にあった($p=0.071$)。同様に 45° view と 30° view の 2 群間の比較では統計学的に有意な差は認めなかったものの、 30° view で %PLB(X)は低い、つまり deep となる傾向があった($p=0.088$)。

(4)%PLB (Y)に関する結果

一元配置分散分析では 30° view 、 45° view、そして 90° view の 3 群間で有意差を認めなかった($p=0.665$)。

多重比較法においても 30° view, 45° view, そして 90° view の各 2 群間で有意差を認めなかった。

【考察】

本研究において、ACL の AMB、PLB の各線維束の中心をマーキングした 3DCT を用い、従来の骨孔位置表示と比較し、鏡視を想定した観察角度によって表示位置に差が生じることを明らかにした。

臨床的にすでに広く使われている 3DCT を用いることで、解剖学的 ACL 附着部を各ポータルの鏡視角度に準じた視点で描出し比較することが可能であった。これまで臨床的によく用いられる 3DCT 画像による Quadrant 法での座標位置と、実際の鏡視像との間にギャップが生じていることが分かった。そのため、ACL 再建術においてより正確な大腿骨孔作成を行うためには、鏡視角度による表示位置の違いに注意が必要である。

本研究での 3DCT を用いた膝関節鏡シミュレーションの検討では、AMB では 30° view にて X 軸 (deep-shallow) 方向で deep となり、 90° view での位置を当てはめると鏡視での shallow (解剖学的には遠位) に骨孔が作成されやすいことが分かった。Y 軸 (high-low) 方向に関しては大きな変化はなかった。PLB では 30° view にて X 軸方向で deep となり同様の傾向を認めたが、Y 軸方向に関しては大きな変化はなかった。すなわち、関節鏡視下 ACL 再建術時に

30° view（前内側ポータルに相当）から鏡視した時に、AMB・PLBともにX軸方向では、術者が思うよりも shallow 方向へ骨孔が作られてしまう事が多く、さらに0° viewに近づく前外側ポータルからは骨孔位置がより shallow に作られやすい事が予想される。限界はあるものの、90° viewに近いポータルを作成することで、術中により正確な骨孔作成ポイントを決定できると考えられる。

骨孔位置の決定には、解剖学的なACL付着部を理解していることが重要である。その境界部の同定法にはいくつかの方法があるが、大きく分けて、本研究のような肉眼解剖による方法と、組織所見を用いたマイクロ解剖による方法³の2通りが挙げられる。組織所見を用いるとより詳細な境界部が解るが、プレパートをを用いた検討であることから全体像が見えなくなってしまう。本研究では、関節鏡シミュレーションを対象としているためマクロ解剖を用いたが、手術用顕微鏡にて可能な限り正確にACL付着部境界部を同定しており、この方法は過去に報告されていない。ACLのマーキングとして、過去に金属ピンを骨に刺す方法⁵や、鋼線で骨に穴を開けてマーキングする方法⁴での報告がある。いずれも付着部の周囲を点としてマーキングしているに過ぎなかった。本法では金属糸を付着部境界へ貼り付けることで、付着部と骨・軟骨の境界を点ではなく連続した線としてマーキングすることができた。また、ACL再建術にて作成された骨孔の位置を検討した報告はあるものの、X線やCT画像のみから検討しており、本来の解剖学的ACL付着部を追っているわけではなく、実際の付着部を対象としている本法が解剖学的ACL付着部を検討するには有意義である。本研究の結果、関節鏡視下ACL再建術時における大腿骨骨孔作成時、鏡視角度をさらに0° viewに近づけるほど、AMB、PLBともに遠位方向（鏡視でのshallow）に作られやすい事が予想される。特に鏡視でのdeep-shallow方向で顕著となるため注意が必要であり、出来るだけ90° viewに近いfar anteromedialポータルより骨孔位置を決めることが最善であり、今後の手術において考慮すべきことが明らかとなった。

臨床の場合において、本研究で得られた知見を関節鏡視下ACL再建術に応用することにより、より正確な付着部を想定し、解剖学的位置に骨孔を作成することができる。臨床の現場において骨孔作成時のピットフォールを回避する一助となる可能性が明らかとなった。

【まとめ】

屍体膝の ACL 付着部を、手術用顕微鏡を用いて indirect insertion と direct insertion に分け、direct insertion の中心を決定した。膝関節鏡シミュレーションを行い、鏡視角度によっては AMB、PLB とともに遠位（鏡視での shallow）方向に解剖学的付着部が変位することが統計学的有意差をもって証明され、間違えた位置に骨孔が作成される可能性があることが判明した。特に AMB で顕著となる可能性を示唆しており、十分な注意が必要であることが明らかとなった。骨孔位置決定の際、far anteromedial ポータルから鏡視することで、骨孔作成の指標となる Quadrant 法に近い視野が獲得できるため、より正確な骨孔位置の作成が可能である。

【引用文献】

1. Kato Y, Ingham SJ, Kramer S, Smolinski P, Saito A, Fu FH. Effect of tunnel position for anatomic single-bundle ACL reconstruction on knee biomechanics in a porcine model. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:2-10.
2. Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg* 1997;10:14-21; discussion -2.
3. Zantop T, Wellmann M, Fu FH, Petersen W. Tunnel positioning of anteromedial and posterolateral bundles in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: anatomic and radiographic findings. *The American journal of sports medicine* 2008;36:65-72.
4. Jenny JY, Ciobanu E, Clavert P, Jaeger JH, Kahn JL, Kempf JF. Anatomic attachment of the ACL. Comparison between radiological and CT analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19:806-10.
5. Iwahashi T, Shino K, Nakata K, Otsubo H, Suzuki T, Amano H, et al. Direct anterior cruciate ligament insertion to the femur assessed by histology and 3-dimensional volume-rendered computed tomography. *Arthroscopy* 2010;26:S13-20.
6. Iriuchishima T, Ingham SJ, Tajima G, Horaguchi T, Saito A, Tokuhashi Y, et al. Evaluation of the tunnel placement in the anatomical double-bundle ACL reconstruction: a cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:1226-31.