

長期ギプス固定を想定した関節不動状態がラット膝関節周囲の 腱附着部に及ぼす影響

八嶋奈央¹⁾ 南園 航²⁾ 内野智貴³⁾ 水藤飛来²⁾ 柏崎保昌¹⁾
眞鍋和親¹⁾ 森山伸一¹⁾ 中井真悟^{1, 4)}

1) 常葉大学健康プロデュース学部 2) 東洋大学大学院ライフデザイン研究科
3) 日本鍼灸理療専門学校 4) 東洋大学ライフイノベーション研究所

Effect of Joint Immobility on the Tendon Attachment Around the Rat Knee Joint Assuming Long-term Cast Fixation.

Nao YASHIMA¹⁾, Wataru MINAMIZONO²⁾, Tomoki UCHINO³⁾, Hirai SUITOU²⁾
Yasuaki KASHIWASAKI¹⁾, Kazuchika MANABE¹⁾, Shinichi MORIYAMA¹⁾
and Shingo NAKAI^{1, 4)}

1) Faculty of Health Promotional Sciences, Tokoha University.

2) Graduate School of Human Life Design, Toyo University.

3) The Japan School of Acupuncture, Moxibustion and Physiotherapy.

4) Institute of Life Innovation Studies, Toyo University.

要 旨

本研究は、関節不動が膝関節周囲の腱附着部に及ぼす影響について組織学的に比較、検討することを目的とした。ウィスター系雄性ラット10匹を用いて関節不動群(IM)と対照群(CO)に分類し、2週間の実験を実施した。脛骨と大腿骨の骨端部に海綿骨が占める領域は、COよりもIMで低かった。COの膝蓋骨は腱の埋入方向と並走する骨梁と関節軟骨から放射状に分布する骨梁によって網状構造が形成されたが、IMでは認めなかった。脛骨に膝蓋靭帯が付着する領域はIMが低値を示した。非加重状態によって長骨骨端部および骨端板直下の骨梁は減少したが、加重のみならず、関節不動に伴った骨周囲の圧迫力の減少が骨梁構造に影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード：メカニカルストレス、腱附着部、骨梁構造

Abstract

The purpose of this study was to compare histologically and examine the effects of joint immobility on tendon entheses around the knee joint. A two-week experiment was performed on 10 male Wistar rats which were divided into two groups: an immobilized joint (IM) group and a control (CO) group. The IM group had smaller trabecular bone areas in the tibial and femoral epiphyseal regions compared to the CO group. The patellae of the CO group had a reticular structure with trabeculae oriented parallel to the direction of tendon attachment and trabeculae arranged radially from the articular cartilage. The IM group, however, did not show this type of structure. In addition, the IM group had a smaller area of patellar ligament attachment to the tibia. Although a non-weight bearing condition reduced the trabeculae of the long bone epiphysis and below the epiphyseal plate, our results suggest that the trabecular structure is affected by not only weight bearing but also reduction of pressure around the bone accompanying joint immobility.

Keywords : mechanical stress, tendon attachment, trabecular structure

1. 緒 言

我が国は超高齢社会を迎えており、世界有数の長寿国であることが知られている¹⁾。今後、ますます平均寿命の延伸が予想される一方で、加齢または運動不足に伴う健康寿命の低下、すなわち要介護となる高齢者の増加が大きな課題となっている²⁾。

実際、要介護となる寝たきり状態の要因には「骨折・転倒」が挙げられ³⁾、骨粗鬆症患者に多く生じることが知られている⁴⁾。骨粗鬆症は閉経後の女性に多く⁵⁾、加齢に伴って有病率が増加し、骨密度の低下と骨質の劣化が骨強度に大きく影響している⁶⁾。このことから、国内では骨脆弱化予防の必要性が高まり、食生活の改善や運動習慣の定着などを目的とする Population approach が行われている⁷⁾。

先行研究では、骨粗鬆症を想定した動物実験が多く⁸⁾、骨量低下や骨脆弱化が示されている。一方、メカニカルストレス低減環境によって骨量低下や骨脆弱化が起こることも報告されている⁹⁾。メカニカルストレス低減環境とは、寝たきり状態や長期ギプス固定環境下のことであり、免荷された状態である。後肢のメカニカルストレス低減下では骨量の減少を示し、関節運動の有無によってその程度が異なる¹⁰⁾。ジャケット型不動装置を用いて関節不動化した群では海綿骨における骨梁幅の減少を示し、免荷だけでなく関節不動化された状態で顕著となることが示されている¹⁰⁾。さらに、下肢骨には膝蓋骨からの圧迫力や膝蓋腱からの牽引力が生じており、免荷環境に伴う膝蓋骨の腱付着部付近の骨量低下が報告されている¹¹⁾。しかしながら、免荷かつ関節不動化環境が膝関節周囲の腱付着部領域にどのような影響を及ぼすかについては報告されていない。このことから、発育期ラットを用いて、免荷かつ関節不動状態が膝関節周囲における腱付着部領域およびその周囲の構造に及ぼす影響について組織学的に比較、検討することを目的とした。

2. 材料および方法

2.1 実験動物

本研究では、7週齢のウィスター系雄性ラット 10 匹を用い、それらを関節不動群 (IM) と対照群 (CO) に分類した。

2.2 実験条件

本研究では後述するジャケット型不動装置 (以下、不動装置) を用いるが、その装置装着に伴う不安を除去するために、三種混合麻酔 (0.5ml/100g 体重) を腹注し、麻酔をかけた。その後、中井ら¹²⁾ の方法に従い、不動装置を用いて股関節および膝関節を伸展位にて固定し、股関節の内転および外転を制限した。さらに、ラットの尾部にヒモを巻き付けて、その表面をガムテープで覆い、

尾部を吊す紐が外れないようにした¹³⁾。尾部懸垂は、通常のケージよりも天井を高くするため、木枠を用いて約 50cm の高さの天井から懸垂した。実験期間は 2 週間とし、1 ケージにつき最大 2 匹の飼育とした。

なお、摂餌摂水に配慮して餌や給水瓶の吸水口を床面近くになるように設置した。さらに、装置装着による足部または尾部の血行障害や外傷が起きないように十分に注意を払い、自傷行為がみられた場合には実験を中止し、痛みから解放するためにイソフルラン過剰投与によって安楽死させた。CO は実験期間と同期間、別ケージにて通常飼育した (図 1)。

2.3 標本の摘出方法

実験期間終了後にイソフルランの過剰投与によって安楽死させた。死亡を確認した後、骨膜が付着した状態で下肢骨を摘出した。ノギスを用いて大腿骨および脛骨の長さを計測して、それぞれの中点を決定した後、歯科用ハンドモーターにて水平切断を行い、速やかに 4%パラホルムアルデヒド溶液 (以下、4%PFA) に浸漬固定を行った (4°C, Over night)。

2.4 組織学的標本の作製と観察

4%PFA で固定した標本は流水水洗 (1~3 時間) した後、真空に保ったデシケーターの中で 70, 95 および 100%エタノール (各 20 分間ずつ) と、アセトン I, II (各 30 分) に浸漬し、脱水透徹を行った。その後、アセトントリゴラック樹脂の混合液 (1:1, 1:3, 1:7) およびトリゴラック樹脂原液 I, II に浸漬 (各 24 時間) し、樹脂に包埋して加温重合した (37, 45, 55, 60°C, 各 24 時間)。完成したブロックはバンドソーにて小さくトリミングし、砥石および 3 段階のラッピングフィルムにて最終的に約 150 μ m の厚さになるまで研磨した。非脱灰樹脂包埋研磨標本 (以下、樹脂標本) の観察面に酸腐蝕 (0.1N 塩酸に 30 秒浸漬) を行い、トルイジンブルー (TB) 染色を施して光学顕微鏡にて観察した。

2.5 計測方法

大腿骨遠位骨端部および脛骨近位骨端部の内外中央部を矢状断した樹脂標本を用いて後述する方法にて、骨形態計測を行った (N=4)。骨端板の前端と後端を結ぶ線を三等分し、垂線を引いて、それぞれ前部、中部、後部に 3 領域に大別した。撮影された標本は、Cellsens (Olympus 社, Japan) を用いて、各領域の面積と領域内の骨梁構造の面積をそれぞれ計測し、骨端部に骨梁構造が占める割合を求めた (図 2)。

2.6 膝蓋骨シェーマ像

CO および IM の矢状断した膝蓋骨の樹脂標本を用い、膝蓋骨をトレースした。腱の埋入方向と並走する骨梁は赤色、関節軟骨面から放射状に分布する骨梁を緑色とし

た。また、骨髓腔は黄色、膝蓋骨周囲の軟骨部分は灰色にそれぞれ色分けを行った。

3. 結果

3.1 骨形態計測

大腿骨骨端部に骨梁構造が占める割合の平均値は、COでは前部が43%、中部が30%、後部が46%であった。IMでは、前部が30%、中部が28%、後部が38%であった。IMの骨端部に骨梁構造が占める割合はCOに比べて、いずれの部位も低値を示し、特に前部に顕著な差を認めた。一方、脛骨ではCOの前部が40%、中部が37%、後部が35%となり、IMでは、前部が17%、中部が30%、後部が27%であった。いずれも大腿骨と同様の傾向であった。

3.2 組織学的所見

COの大腿骨遠位骨端部および脛骨近位骨端部の骨梁は、密な網状構造を示していた。IMの同部位の骨梁はCOと同様に網状に配列していたが、全体的に疎となっており、配列も不規則であった(図3)。膝関節部周囲の大腿骨および脛骨の骨端板は、COに比べてIMで薄くなっていた(図4)。さらに、COの骨端板直下における一次海綿骨は、細い骨梁が密に存在し、それらは上下方向に配列していた。さらに二次海綿骨は、一次海綿骨に比べて密度は低下するが、太さを増し、骨端板から離れた部位にまで広く分布していた。それに対し、IMではその消失が顕著となり、全体的に疎となって分布を認めた(図5)。膝蓋腱付着部である脛骨粗面は、COに比べてIMの骨端板の厚さおよび腱付着部領域が減少していた(図6)。膝蓋骨の体表側には腱の埋入方向と並走する太い骨梁を認め、関節軟骨側には放射線状に分布する骨梁が存在していた。この2つの骨梁は網状構造を構成しており、COでは体表側および関節軟骨側の骨梁の融合を認めたが、IMではそのような部位は疎となっており、顕著に減少していた。体表側の骨梁にシャープ線維が埋入する膝蓋骨の近位部と遠位部では、いずれも大腿四頭筋腱や膝蓋腱が埋入していた(図7)。膝蓋骨の近位部および遠位部の腱埋入部は、COでは赤紫色に染色された領域を多く認め、腱埋入方向に沿っていた。一方、IMはCOと同様の染色性を認めたが疎となっており、さらに、骨表面に薄青色に染色された領域を認めた(図8)。

4. 考察

骨の恒常性は、破骨細胞による骨吸収と骨芽細胞による骨形成のリモデリングによって保たれている¹⁴⁾。骨に対する適度なメカニカルストレスは骨形成を促進することにより骨量を増加する一方で、メカニカルストレスが

減少すると骨吸収が旺盛となり、骨量を減少する¹⁵⁾。本研究では、長期臥床やギプス固定による非活動的な環境を想定した関節不動状態が、ラット膝関節の腱付着部およびその周囲の構造に及ぼす影響について組織学的に比較、検討した。

骨の形成は軟骨原基に血管が侵入して一次骨化中心を形成し¹⁶⁾、骨端部には二次骨化中心が形成されることに始まる。ラットは四足歩行の運動形態であり、常時、膝を屈曲させた状態にあることが多い¹⁷⁾。また、ラットの後肢を不動状態にすることで、脛骨近位骨幹端部における骨梁消失は前方から後方に拡大することから、後方の骨梁は大腿骨側からの加重をより強く受ける部位である一方で、前方部の骨梁には不動化の影響が最も現れやすいことが示されている¹⁸⁾。

本研究では、大腿遠位骨端部および脛骨近位骨端部の樹脂標本を用いて骨形態計測を行った。骨端部を前部、中部、後部の3領域に分類し、骨端部に海綿骨が占める割合を求めた。IMの大腿骨遠位骨端部および脛骨近位骨端部は、3領域ともCOに比べて低値を示し、前部で顕著であった。これは、不動化に伴う非加重の影響が骨端部の前部に現れることを示している。COの大腿骨遠位骨端部を観察すると、骨量は膝蓋大腿関節面に対して垂直に配向しており、密な網状構造であった。一方、IMの同部位の骨梁はCOと同様に網状に配列していたが、全体的に疎となっており、配列も不規則であった。膝蓋骨の近位、遠位部に付着する腱に生じた遠心性の張力が大腿骨遠位骨端部の前面への圧迫力となることが報告されている¹¹⁾。通常飼育下においてはこの部位に圧迫力が加わるが、関節不動化によって圧迫力が低下したため、前部における骨梁構造が減少したものと推測される。

COの脛骨近位骨端部においては、全体的に骨梁が密となり、膝蓋腱に直交する方向に骨梁が配向していた。一方、IMにおいては、COと同様に膝蓋腱に直交して配向する骨梁を認めたものの、疎となって分布していた。また、IMに比してCOの顆間隆起の前面に、軟骨細胞層を認めた。このことは、COの膝蓋腱に直交して配向する骨梁は、膝屈伸運動に伴い膝蓋腱から脛骨近位骨端へ圧迫力が加わることを示しており、軟骨細胞の増殖にも寄与したと考えられる。

骨端板の肥大軟骨細胞層でアポトーシスが起り、残存した基質部分に骨が添加されることによって軟骨組織から骨組織への置換される¹⁶⁾。本研究では、IMの大腿骨遠位部および脛骨近位部の骨端板がCOよりも厚くなっており、このことは、メカニカルストレスの低減により軟骨細胞の分化および分裂が抑制されたことによって骨端板が非薄化したものと推測する。本研究では、両群の骨端板における軟骨細胞層の組織学的比較は行っておらず、メカニカルストレス低減に伴う骨端板の厚さの差異については推測の域を超えない。

守田らは幼若期と成熟期ラットを用いて、発育に伴う

一次および二次海綿骨の構造変化について検討している¹⁹⁾。そこでは、ラットの発育にしたがって二次海綿骨の厚さや、骨梁の太さが増すことによって骨梁の密度も増加する。横方向に配列する骨梁も増加し、網状に配列することによって骨梁間の連結性を高め、骨梁構造の力学的強度を高めていることが示されている¹⁹⁾。不動化の影響は、横方向に配列する骨梁から消失し、骨梁の密度および太さの減少が顕著となる。本研究のIMでは骨梁が減少しており、特に横方向の骨梁が消失し、全体的に疎であった。この結果は飛田ら¹⁸⁾の報告に類似していた。

膝蓋骨の近位および遠位部には、それぞれ腱が埋入する。腱付着部は、4つの層から構成されており、表層から腱線維からなる膠原線維層、未石灰化の線維軟骨層、線維軟骨が石灰化した石灰化軟骨層、骨層である²⁰⁾。吉良は、メカニカルストレス低減環境下において線維軟骨層が肥厚することを報告している¹¹⁾。本研究では、IMの線維軟骨層における厚さがCOに比して増大していた。このことは、関節不動化に伴う腱の牽引力低下が、腱付着部における骨形成が抑制され、未石灰化層である線維軟骨層の増加に寄与したものとと思われる。

石灰化軟骨層はムコ多糖類によって占められ²¹⁾、好塩基性を示すことによって²²⁾、異調染色(メタクロマジー)が生じる。免荷状態では通常飼育に比較して石灰化軟骨層に多くの破骨細胞が出現することも報告されている¹¹⁾。本研究では、COの膝蓋骨近位および遠位の腱付着部には、広範囲にメタクロマジーを認めたが、IMではその領域はわずかであった。このことは、腱付着部の石灰化軟骨層において破骨細胞の活性化に繋がり、骨吸収に寄与したものとと思われる。膝屈伸運動による大腿四頭筋腱の牽引力は膝蓋骨から膝蓋腱を介して脛骨粗面に伝わる。腱は主にコラーゲン線維によって構成される。それらは、線維芽細胞によって形成されるが、一般的に、コラーゲン線維は成長に伴って太さを増し、運動によって著明となる。さらに、腱の骨内固定実験において、抗引張力が経時的に増加することが示されており²³⁾、Elliott²⁴⁾は、腱の強さは腱の太さとコラーゲン量に関係するとしている。本研究では、膝蓋腱が埋入する脛骨粗面部において、COに比してIMの腱の太さが減少していた。このことは、関節不動化によって牽引力が低下したことに起因するものと推測される。さらに、IMよりCOの腱付着部領域が大きかったのは、腱の経時的な牽引力の増加に伴う力学的ストレスを周囲へ分散させるためであることを示すものである。

骨へのメカニカルストレスに対する応答はFrost²⁵⁾のメカノスタット理論に基づく局所性変化であり²⁶⁾、荷重の減少は大腿骨や脛骨のような体重支持骨の骨脆弱化を引き起こし¹⁸⁾、膝蓋骨は直接的に荷重を受けることはないと言われる。しかし、本研究では不動化に伴って膝蓋骨の骨梁の減少がみられた。吉良ら¹¹⁾は、尾部懸垂がラット膝蓋骨の骨形成過程に及ぼす影響について報告してお

り、免荷が骨梁の減少を招く点で本研究結果と一致するものであった。

膝蓋骨の骨梁構造を観察するとCOにおける膝蓋骨の体表側には腱の埋入方向と並走するように配列する太い骨梁が見られ、関節軟骨側には放射線状に分布し、膝蓋面に垂直な方向に配列する骨梁が存在した。このことは、遠心性の張力が大腿骨へ押し付ける圧迫力に合成されることを示すものである。一方、膝蓋骨の体表側と関節軟骨側の骨梁は、膝蓋骨にかかる張力や大腿骨への圧迫力に対応するように配列していた。COに比べIMでは膝蓋骨の体表側および関節軟骨側のいずれの骨梁も減少がみられ、このことは、大腿四頭筋腱と膝蓋腱からの牽引力の低下、そして大腿骨への圧迫力の低下が寄与することを示している。

5. 結 語

メカニカルストレス低減環境によって長骨骨端部および骨端直下の骨梁は減少したが、加重の減少だけでなく、関節不動に伴う骨周囲への圧迫力の減少が骨梁構造に影響を及ぼすことが理解された。また、膝蓋骨の骨梁構造や脛骨の腱付着部領域の構造には、関節不動化による腱の牽引力低下が影響することが示唆された。

6. 倫理審査

本研究は常葉大学動物実験委員会の審査により承認された(第2019-A12)。

7. 謝 辞

本論文は、卒業研究論文の代替として執筆したものであり、ご指導下さいました常葉大学健康プロデュース学部健康柔道整復学科の先生方には厚く御礼申し上げます。また、大学生生活の苦楽を共に過ごしたゼミ生の皆様には感謝しております。このように、様々な方々に支えられて本論文を執筆させていただきましたことを心より感謝申し上げます。なお、本研究の一部は、科学研究費(19K21518)の助成を受けて行った。

8. 引用文献

- 1) 竹内 達夫：高齢化社会と保健医療. 順天堂医学 31 : 55-65, 1985.
- 2) 辻 一郎：健康寿命と介護予防. 理学療法の歩み 15 : 2-8, 2004.
- 3) 厚生労働省：グラフでみる世帯の状況 48, 2018.
- 4) 山田 孝子, 他：パーキンソン病における骨粗鬆症と骨折. 日本老年医学会雑誌 32 : 637-640, 1995.
- 5) 井上 聡：閉経後骨粗鬆症. 日本内科学会雑誌 94 :

626-631, 2005.

6) Lawrence G. Raisz. : Pathogenesis of osteoporosis : concepts, conflicts, and prospects. 115 : 3318-3325, 2005.

7) 重松 良裕, 他 : 身体活動を促進するポピュレーションアプローチの評価方法—改変型 RE-AIM モデル : PAIREM—. 運動疫学研究 18 : 76-87, 2016.

8) 遠藤 実 : 卵巣摘出後の骨代謝異常に関する研究—脛骨の成長と抜歯創の修復過程について—. 岩医大歯誌 11 : 175-194, 1986.

9) 松瀬 博夫, 他 : 免荷が大腿骨近位部骨密度へ与える影響. リハビリテーション医学 43 : 537-541, 2006.

10) 鈴木 健太, 他 : ラット関節軟骨および関節包の構造に及ぼす後肢不動化と尾部懸垂の影響の比較. ライフデザイン学研究 10 : 237-249, 2014.

11) 吉良 裕一郎, 他 : ラット膝蓋骨における骨形成過程に及ぼす尾部懸垂の影響. 東洋大学大学院紀要 53 : 155-167, 2016.

12) 中井 真悟, 他 : ラット大腿骨における不動中の鍼通電刺激の影響. 東洋大学大学院紀要 52 : 255-271, 2015.

13) 神尾 強司, 他 : 加重低減に伴うラット脛骨の基質と骨膜の構造変化. 東洋大学大学院紀要 52 : 215-226, 2015.

14) 高久田 和夫, 他 : 骨の機能的適応に関する仮説 (成長因子の機械的負荷による輸送). 日本機械学論文集 (A 編) 58 : 1015-1021, 1992.

15) 高田 信二郎, 他 : 廃用性骨萎縮の病態解析. 中部日本整形外科災害外科学会雑誌 50 : 51-52, 2007.

16) 上田 晃三, 他 : 骨の成長・発達. バイオメカニズム学会誌 32 : 57-60, 2008.

17) 守田 剛, 他 : 発育に伴うラット脛骨の形態変化ならびにリモデリングに関する研究. ライフデザイン学研究 6 : 197-209, 2010.

18) 飛田 哲也, 他 : 発育期ラット脛骨の構造に及ぼす短期間不動の影響. ライフデザイン学研究 7 : 257-271, 2011.

19) 守田 剛, 他 : 発育期ラットにおける骨梁構造の特徴に関する研究. 東洋大学大学院紀要 48 : 101-115, 2011.

20) 及川 正明, 他 : 競走(枝)馬の跛行をもたらす疾患特に橈骨結節における骨付着部症. 産業動物臨床医学雑誌 1 : 25-29, 2010.

21) Yamada, M. : Ultrastructural and cytochemical studies on the calcification of the tendon bone joint. Arch. Histol. Jpn. 39 : 347-378, 1976.

22) 平野 成彦 : ヒト耳介軟骨細胞と複合型吸収性スキャフォールド (nano PGA /PCL) を用いた耳介形状軟骨の再生誘導. 近畿大医学雑誌 43 : 17-30, 2018.

23) 明石 英夫 : 腱の骨内固定に関する実験的研究. 岡山医学会雑誌 96 : 1003-1017, 1984.

24) Elliott. D. H. : The biomechanical properties of tendon in relation to muscular strength. Ann. Phys. Med. 9 : 1-7, 1967.

25) Frost. H. M. : Bone "mass" and the "mechanostat" : a proposal. Anat. Rec. 219 : 1-9, 1987.

26) 山内 秀樹, 他 : 非荷重ならびに再荷重に伴う骨応答と等尺性抵抗運動の影響. リハビリテーション医学 40 : 41-48, 2003.

9. 図・表および図表の説明文

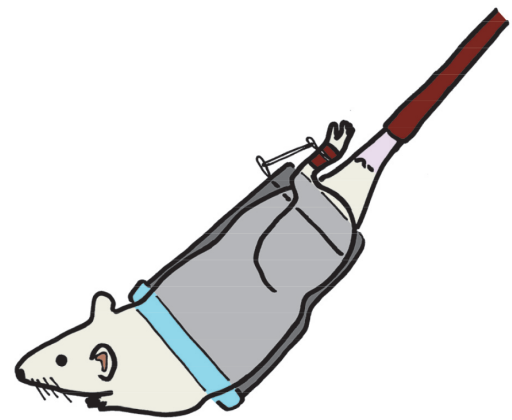


図1. 実験プロトコル (文献12より引用)

実験期間中は後肢に加重が掛からないようにするため、尾部懸垂およびジャケット型不動装置を用いて、股関節および膝関節を伸展位に固定し、股関節の内転および外転を制限した。

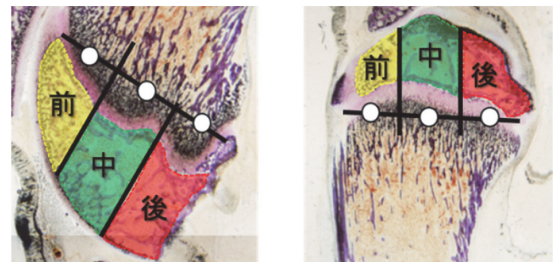


図2. 計測部位

(左 : 大腿骨遠位骨端部, 右 : 脛骨近位骨端部)
骨端板の前端と後端を結ぶ線を三分し、垂線を引いて大別した前部, 中部, 後部の3領域を計測部位とした。

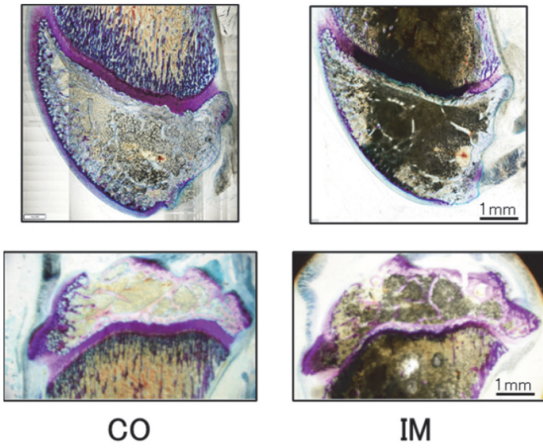


図 3. 骨端部の骨梁構造
上段：大腿骨 下段：脛骨

CO の骨梁は、密な網状構造であった。IM では全体的に疎となっており、配列も不規則であった。

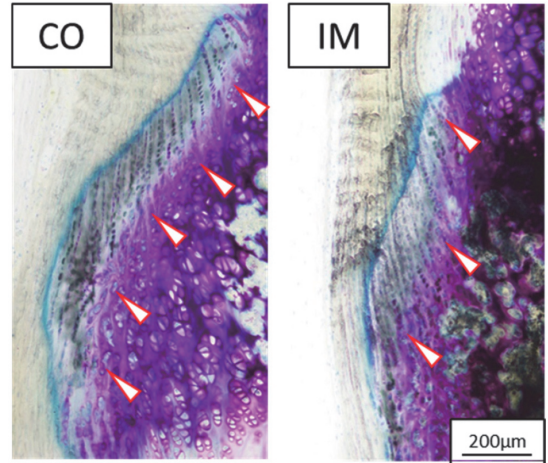


図 6. 脛骨粗面周囲部の腱埋入部の構造 (矢頭：腱付着部)
CO に比べて IM の腱付着部領域が減少していた。

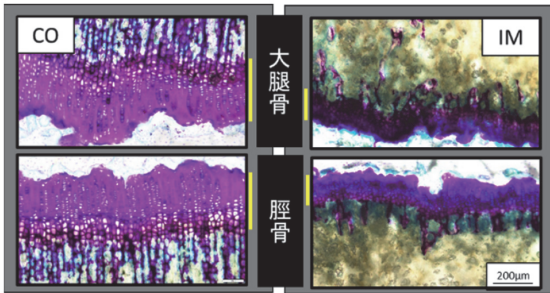


図 4. 膝関節部の骨端板の厚さ
上段：大腿骨遠位骨端板，下段：脛骨近位骨端板

膝関節部周囲の大腿骨および脛骨の骨端板は、CO に比べて IM が薄かった。

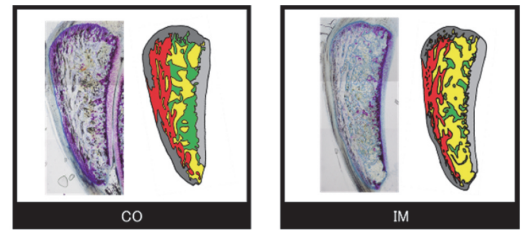


図 7. 膝蓋骨の組織図およびシェーマ図
赤：腱の埋入方向と並走する骨梁
緑：関節軟骨面から放射状に分布する骨梁

膝蓋骨の体表側には腱の埋入方向と並走する太い骨梁を認め、関節軟骨側には放射線状に分布する骨梁が存在していた。この 2 つの骨梁は網状構造を構成しており、CO では体表側および関節軟骨側の骨梁の融合を認めていたが、IM ではそのような部位は疎となっていた。

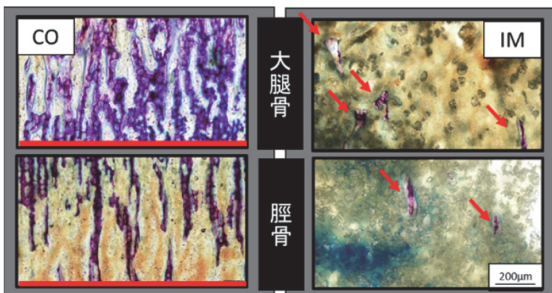


図 5. 膝関節周囲部の海綿骨の骨梁構造
上段：大腿骨 下段：脛骨(赤線、矢頭：骨梁)

CO の骨端板直下に存在する一次海綿骨は、細い骨梁が密に存在し、それらは上下方向に配列していた。二次海綿骨は、一時海綿骨に比べて密度が減少したが、太さを増して骨端板から離れた部位にまで広く分布していた。一方、IM ではその消失が顕著となり、全体的に疎となっていた。

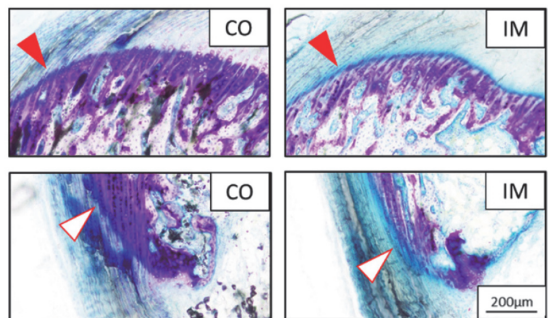


図 8. 膝蓋骨における腱付着部の構造
(赤矢頭：大腿四頭筋腱埋入部，白矢頭：膝蓋靭帯埋入部)

膝蓋骨の近位部および遠位部の腱埋入部は、CO では赤紫色に染色された領域を多く認め、腱埋入方向に沿っていた。一方、IM は CO と同様の染色性を認めたが疎となっており、さらに、骨表面に薄青色に染色された領域を認めた。