

論文の内容の要旨

氏名：種子島 貢司

博士の専攻分野の名称：博士（獣医学）

論文題目：犬の膝関節における十字靭帯の機能解剖と関節運動の解析

前十字靭帯断裂は、犬で最も多い後肢の外科手術適応疾患であり、日常の診療においても遭遇する機会が多い。犬の膝関節内には前十字靭帯（CrCL）と後十字靭帯（CaCL）が存在し、膝関節の安定化機構として中心的な役割を果たしている。CrCLは、脛骨の前方変位の抑制、膝関節の過伸展の防止、脛骨の過度な内旋の制御を担っており、一般的にCaCLよりも断裂しやすい。CrCLが断裂すると、膝関節が不安定になり、やがて跛行を呈するようになる。現在、そのような症例に対し、関節包外制動術や脛骨骨切りによる膝関節安定化術が実施されているが、犬においてはCrCLの解剖学的な再建を目指した術式は未だ確立していない。現在、ヒトでは、十字靭帯の機能解剖に関する詳細な情報が蓄積され、標準的な外科的治療法として解剖学的再建術が実施されている。一方、犬においては、CrCLの機能解剖に関する研究がほとんど行われておらず、解剖学的再建術を実施するための情報が不足している。また、犬でCrCLの解剖学的再建術を確立するためには、残存するCaCLの機能解剖や、各靭帯またはその一部が断裂した際の膝関節運動にも精通しておく必要がある。そこで、本研究では、犬の前十字靭帯断裂の新規治療法の開発の基礎となる情報を集積する目的で、CrCLとCaCLの機能解剖を詳細に検討し、従来にはない手法を用いて膝関節運動を動的に検証した。

第一章 犬の前十字靭帯における前内側帯および後外側帯の機能解剖

犬のCrCLは、主に前内側帯（CrMB）と後外側帯（CdLB）の2つの帯で構成されているが、ヒトと比較して各帯の形態や機能に関しての検討は十分に行われていない。そこで、本章では、犬のCrCLを構成するCrMBとCdLBの機能解剖についての詳細な検討を行った。

本検討は、他の目的で安楽死された健常ビーグル犬の左後肢（n=12）を使用した。軟部組織を除去した後、大腿骨側において、CrCL付着部の形態、膝関節可動時の付着部近傍の折り返しの有無、付着部頭側のresident's ridgeの存在について観察を行った。次いで、CrMBとCdLBの大腿骨および脛骨への付着部位をQuadrant法にて客観的に計測し、各帯の付着部面積も客観的に算出した。さらに、CrMBとCdLBを4本の線維束に分割し、その走行と膝関節可動時の配列の変化を観察した。最後に、膝関節可動時における、CrCL、CrMB、CdLB、各線維束の張力を荷重測定器にて計測した。

犬のCrCL付着部周囲の解剖は、fan-like extension fiberやresident's ridgeが認められないなど、ヒトと大きく異なっていた。大腿骨側のCrMBの付着部は、CdLBよりも尾近位側に位置していた。また、脛骨側においては、CrMBの方がCdLBに比べやや頭側に付着していた。大腿骨と脛骨におけるCrMBの付着部面積は、ともにCdLBよりも大きい傾向が認められた。CrMBまたはCdLB内の各線維束は、膝関節可動時に同じ配列を維持しておらず、屈曲するとともに帯内の線維束が交差するように捻転していた。CrCLとCrMBの張力は、膝関節を屈曲するに従いやや低下するものの維持されていた。CrMBでは、中心部の線維束が張力の維持に貢献していた。一方で、CdLBの張力は膝関節を屈曲するとともに低下していった。CdLBの張力は、外側および尾側の線維束により維持されていたが、屈曲するに従って全ての線維束の張力が減じていった。

本検討において、犬のCrMBとCdLBの付着部位を客観的に示すことができた。また、犬のCrCLは伸展時

には両帯が緊張し、屈曲時にはCrMBのみが緊張することが客観的に再現することができた。さらに、CrMBとCdLBの張力の差異や、関節可動に伴う各線維束の張力の強弱も確認でき、新たな知見を得ることができた。

第二章 犬の後十字靭帯における前外側帯および後内側帯の機能解剖

後十字靭帯(CaCL)は、CrCLよりも少し太く、脛骨の尾側への変位、脛骨内旋および過伸展を制御している。犬のCaCLは、前外側帯(CrLB)と後内側帯(CdMB)の2つの帯で構成されているが、各帯の形態や機能に関しての検討が十分になされているとは言い難い。そこで、本章では犬のCaCLを構成するCrLBとCdMBの機能解剖について詳細な検討を行った。

本研究は、他の目的で安楽死された健常ビーグル犬の左後肢(n=12)を使用した。軟部組織を除去した後、大腿骨側において、CaCL付着部付近のmedial intercondyler ridgeおよびmedial bifurcate ridgeの存在について観察を行った。次いで、CrLBとCdMBの大腿骨および脛骨への付着部位をQuadrant法にて計測し、各帯の付着部面積も客観的に算出した。さらに、CrLBを2本、CdMBを4本の線維束に分割し、その走行と膝関節可動時の配列の変化を観察した。最後に、膝関節可動時におけるCaCL、CrLB、CdMB、各線維束の張力を荷重測定器にて計測した。

犬のCaCLの大腿骨側の付着部付近は、ヒトと異なりmedial bifurcate ridgeは存在しなかったが、medial intercondyler ridgeは認められた。犬のCdMBは、ヒトと同様に大腿骨内側顆の内側面に付着していたが、CrLBは大腿骨顆間窩に付着していた。また、脛骨側においては、CrLBの方がCdMBよりも頭内側に付着していた。大腿骨と脛骨におけるCdMBの付着部面積は、ともにCrLBよりも大きい傾向が認められた。CrLBおよびCdMBの各線維束は、膝関節の可動とともに交差していく様子が観察された。CaCLとCdMBの張力は膝関節を屈曲するに従い低下するのに対し、CrLBは伸展するに従い低下した。

本検討では、ヒトのCaCLと大きく異なり、犬のCrLBは大腿骨顆間窩に付着しているという特徴的な解剖所見が初めて明らかとなった。また、各帯の線維束は膝関節可動時に同じ配列を維持しておらず、伸展と屈曲で異なる帯が緊張していた。さらに、関節可動に伴う各線維束の張力の強弱も確認することができ、CdMBがCaCLの張力に貢献している可能性が示された。

第三章 4D-CTによる犬の十字靭帯断裂モデルにおける膝関節運動の解析

犬の関節運動の解析は、X線透視装置を用いた検討が中心となっているが、その手法は2次元であり立体的な情報を得ることができない。最近になって、CT技術が進歩し、4次元CT(4D-CT)の撮影が可能となり、ヒトでは関節運動の研究にも使用されるようになってきた。そこで、本章では、犬の十字靭帯断裂モデルを作製し、4D-CTにて膝関節運動を検討した。

本検討では、他の目的で安楽死された健常ビーグル犬の左後肢(n=15)を使用した。本検討では、正常な靭帯を有する群(Intact群:n=3)、CrCLのCrMBのみを断裂させた群(CrMB群:n=3)、CrCLのCdLBのみを断裂させた群(CdLB群:n=3)、CrCLを完全に断裂させた群(CrCL群:n=3)、CrCLおよびCaCLを完全に断裂させた群(CrCL+CaCL群:n=3)の5群に分けて検討を行った。4D-CTの撮影には、320列Area Detector CT(Aquilion One™: キヤノンメディカルシステムズ)を用いた。本検討では、膝関節の角度が135°から40°までの範囲で屈曲させながらCTの撮影を行った。大腿脛関節の関節運動を検討する目的で、膝関節可動時における脛骨の回旋、脛骨の前後方向への変位、脛骨の内反角度および外反角度を評価した。

膝関節可動時における脛骨の回旋運動を確認したところ、Intact群では有意な回旋は認められなかったが、その他の群では膝関節を屈曲させるにつれて脛骨の内旋が認められた。脛骨の内旋の程度は、CrCL+CaCL群、CrCL群、CrMB群、CdLB群の順で大きい傾向があった。膝関節可動時における脛骨の前方変位は、CrCL

群と CrCL+CaCL 群においてのみ認められた。いずれの群においても、膝関節可動時に脛骨の内反および外反は認められなかった。

本検討は、4D-CT を用いて犬の十字靭帯断裂モデルの関節運動を検討した初めての報告である。CrCL の部分断裂モデルにおいて、脛骨の前方変位は生じないことが再確認されたが、脛骨の内旋は生じていることが明らかになった。完全断裂モデルでは、脛骨の内旋に加え、明らかな前方変位も生じていることが動的に確認できた。また、CrCL 群と両十字靭帯の完全断裂モデルである CrCL+CaCL 群を比較することで、CaCL の機能の一端も確認することができた。

総括

本研究では、犬の CrCL および CaCL の機能解剖についての新たな知見を得ることができた。また、4D-CT という新規手法を用いて、これらの靭帯の断裂による膝関節運動への影響も把握することができた。これらの結果は、前十字靭帯断裂の病態解析に寄与するだけでなく、残存する CaCL についての詳細な情報を得ることもできた。さらに、犬で CrCL の解剖学的再建術を実施する際に必要な骨孔の作製位置を客観的に提示することができ、2重束または多重束のグラフトを用いたより正確な手技が要求されることも明らかにした。本研究で得られた成果は、犬の前十字靭帯断裂の新規治療法として解剖学的再建術を開発する際に大きく貢献することが期待される。