

平成 22 年 5 月 27 日現在

研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2007～2009  
課題番号：19700508  
研究課題名（和文） 関節動態の直接計測による詳細解析とモデル化  
研究課題名（英文） Detailed analysis and modeling by direct measurement of joint movement  
研究代表者 山門 一平 （YAMATO IPPEI）  
東海大学・医学部・助教  
研究者番号：20328157

研究成果の概要（和文）：本研究では、生態条件に近い防腐処置技術（改良されたエンバーミング法）を用い、ヒトの遺体における主要な関節で靭帯の運動動態を計測した。その結果、運動に伴い、靭帯は各測定部位で伸張や短縮するが、この変動はとて僅かであった。すなわち、生理的運動条件下においては、靭帯動態が僅かであった。

研究成果の概要（英文）：This study reported direct measurement for near condition of biogenic human and the materials used cadaver to aseptic by arterial embalming method and strain analysis. Ligaments function for joints stability is extended and contraction. But strain data of dynamic measures are a little. The measurements of joint strain was only a little change when physiological motion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,300,000	0	1,300,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	540,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学

キーワード：関節、運動動態、ひずみ、関節可動域、モデル化、靭帯、バイオメカニクス、生体

## 1. 研究開始当初の背景

以前より、関節の構成要素である靭帯の構造と機能については、動きの無い静的な構造物として研究が進められてきた。これを基本データとしてスポーツ医学研究では、運動という動的な研究対象とした目的として、生体のモデル化<仮想形態>、生体体表・放射線を使用した観察<体表・透化観察>を主とした間接的研究と、遺体を用いた解析<直接動態>による直接的研究とによってバイオメカニクスが発展してきた。しかし、間接的研究においては、ヒトの身体内部から直接得られた情報では無いためにその信頼性や正確性に欠ける。また、直接的研究では、遺体を用いた研究であってもホルマリンなどで固定された影響により関節可動域が極めて低く、生前の運動が正確に再現されていない。

関節を保持・構成する靭帯は一方向の直線的な線維ではなく、浅・深層や内・外側での走行や近・遠位部の強度が異なるので、立体的複合構造物として考え直す必要があることが分かってきた。しかし、臨床においても靭帯は一方向性と考えられることが多く、靭帯損傷における再建・治療の効果としても何らかの影響が及ぼされていることを予測している。

そのためにも(1)各関節を構成する靭帯の詳細な動的解析を進め、(2)靭帯の運動動態をヒトで直接計測(3)立体的な運動動態の再現・運動導体モデル化を進めることが必要であると考えに至った。

靭帯の運動動態解析に、関節固有形態と筋の出力を統合することで、ヒトの関節にお

けるミクロ的で三次元的な詳細バイオメカニクスが完成する。

## 2. 研究の目的

### (1) 遺体防腐処置法の開発

正確・詳細な動態解析をするためには、生前のヒトの関節動態を再現させ、靭帯の詳細なデータを得る必要がある。従来の防腐処置法では、固定液(ホルマリン等)の影響で筋肉が完全に固定され、関節の可動制限が生じて運動解析には不適であった。本研究では、応用された遺体処置法であるエンバーミングを用いることで生前の関節運動を可能とする。

### (2) セミマクロによる関節靭帯の線維方向と強度の解明

従来の研究では、靭帯をひとつの構造物ととらえていた。しかし、靭帯の構造は一定の方向だけではなく、力学的に適応した複数の線維方向が存在することが解ってきている。特に膝の十字靭帯などでは、臨床的な意義が大きいために詳細な研究が進み、臨床的に応用されている。

### (3) 靭帯の運動動態の解明

靭帯の微細線維走行に合わせて、局所に生じるひずみを計測し、靭帯の運動動態を直接計測する。これにより、ひとつの靭帯に生じる複数の力学測定が可能で、靭帯特有のミクロ的バイオメカニクスが明らかとなる。

### (4) 関節のマクロ解剖学的によるバイオメカニクスの解明

従来のコンピューターなどで計算されたバイオメカニクスでなく、直接ヒトの関節の靭帯で計測されたデータをもとに、関節

の運動動態を新しいマクロ解剖学的バイオメカニクスとして明らかとする。

(5)関節運動動態の完成<三次元・動的>  
関節の靭帯における運動動態のモデル化、骨連結・筋の出力を含んだ総合的な三次元の関節運動動態モデルを完成させる。

### 3. 研究の方法

#### (1)実験系の確立と実施

##### ①遺体防腐処置方法の決定

エンバーミング（灌流固定法）を応用して、遺体を生前の関節可動域に保つ。

方法は、大腿動脈・総頸動脈・上腕動脈などから固定前液を注入し、大腿静脈・内頸静脈・上腕静脈などから血液を排出する。

固定前液には pH-A, cell conditioner (champion) などの薬品を用い、効果は血管内の血液をスムーズに排出、組織の状態を良好に保つために使われる。

固定操作は、固定液としてホルマリン、フェノール、グリセリン、アルコール、水を主成分としており、さらに、関節の動きを低下させてしまう筋肉の拘縮を抑制するための開発を引き続き行う。固定液は固定前液と同様に動脈から入れ、静脈から排出する。

ホルマリンによる施術者の暴露は有害であり、規制の対象となっている。研究の安全性を確保するためにも低ホルマリン灌流で感染症などから十分な安全性を確保する方法も完成させる。

##### ②関節の靭帯のセミマクロ的研究

靭帯を剖出することで、線維方向などを詳細に記録し、後の運動動態実験の基礎データとする。

研究箇所は、膝関節の靭帯群とする。膝関節は運動性が高く、関節内・外に靭帯が存

在し、この部位は臨床的にも研究が進んでおり、多くの基礎的なデータが得られているので、本研究との相関関係についても検討を行える利点がある。

肉眼解剖として靭帯走行を確認・撮影により記録する。顕微鏡観察によりその線維の特徴（主に線維の走行特徴や線維の量）を記録する。

さらに、エンバーミングの大きな利点である血管系の良好な保存状態を利用し、靭帯に入り込む微細血管系の局所解剖も同時に行う。これにより、臨床での靭帯再建方法の改善を試みる。方法は、エンバーミングによって血液が取り除かれた血管内にバリウムを加圧投与し、エックス線撮影を行う。

##### ③靭帯の運動動態解析

靭帯の特徴的な線維方向（関節の靭帯のセミマクロ的研究で取得）に沿って超小型のひずみ測定装置を設置し、ひずみの計測値（応力値）から微小の運動動態を計測する。ひとつの靭帯に複数のひずみ計測を行うことで、線維方向に応じたひずみが得られ、詳細な靭帯運動動態が明らかとなる。

現在までに膝・肘関節の主要な靭帯の計測が終了している。本研究においてはさらに細かい靭帯の動態測定を行い、動態測定対象関節も拡大させ、主要な関節は全て計測を行えるようにする。

#### (2)関節のバイオメカニクス

靭帯の運動動態の 19 年度の基本データを基に、関節のバイオメカニクスを構築する。特に靭帯の走行・量的な特徴から靭帯固有の静的な強度が再現され、靭帯に生じるひずみ値から関節角度による応力の変化が得られ、両者を統合することにより動的な運動動態特性とその強度が明らかとなる。

従来までの線と点で行うバイオメカニクスよりも詳細で再現性・信頼性の高い研究を目指す。また、旧来の関節のバイオメカニクスとの相互関係の検討も行う。

### (3)研究の発展とまとめ

膝関節の研究を基に、他関節の靭帯群の研究に広げる

19-21 年度で得られた、本研究の実験系を基に、関節の靭帯群だけでなく、ヒトの関節を構成する全身の靭帯データの取得を順次行い、運動動態のモデル化を図る。これにより、全身の骨格を保持する靭帯の機能が特定の関節と全身でバイオメカニクスすることが可能となる。

さらに運動に関わる骨や筋・関節包などの他の器官を含めたモデル化研究に移行させて、完全なヒトのバイオメカニクスを構築する。

## 4. 研究成果

19、20 年度は、生体に近い運動可動域を維持する目的の防腐処置の開発に主眼を置いた。特に、術者への感染症や薬剤暴露等に対する完全なる対策を含めた処置法とした。防腐処置法としてはエンバーミングと呼ばれる灌流固定法を採用し、最低限で効果のあるホルマリン濃度を使用する一方で、グリセリンによって組織の柔軟さや揮発を抑制した。

この改良された防腐処置技術を用い、各関節の靭帯におけるひずみデータを多く蓄積することから、標準化された関節動態をモデル化する作業に着手することができた。さらに、遺体の関節動態を評価すべく、実際の生体における関節可動域の計測を行った。生体の関節可動域計測は、上下肢の主要な関節で、肩関節、肘関節、股関節、膝

関節、足関節を主として、その他の関節においても計測を行った。計測は関節角度計を用い、肢位や計測法は日本整形外科学会と日本リハビリテーション学会が制定する関節可動域表示並びに測定法を用いた。

結果、生体と遺体では測定された年齢が異なるものの、従来よりも柔軟で生体に近い運動動態が再現されているものと考えることができた。

ひずみデータ計測はご遺体から関節を剖出したうえで、靭帯の特徴的な線維方向(関節の靭帯のセミマクロ的研究で取得)に沿って超小型のひずみ測定装置を設置し、ひずみの計測値(応力値)から微小な運動動態を計測した。ひずみデータだけでは実際の生体での運動動態と異なることが予測されるために、生体の正確な関節可動域とひずみデータの照合を行った。

これにより、線維方向に応じたひずみと実際の関節可動から、21 年度において詳細な靭帯運動動態を解析した。

本研究において、19-21 年度で計測されたひずみデータは、胸鎖関節で 7 体 13 例、肘関節 9 体 14 例、仙腸関節 10 体 20 例、膝関節 14 体 25 例となった。

さらにそれぞれの大型の靭帯部位においては、さらに詳細な靭帯の運動動態を分析するために、複数の計測点を増設・設置した。これにより主要 4 関節における運動動態のモデル化をまとめた。ひずみデータを解析した結果、4 関節で共通した特徴として、先行研究等によって既知されていた通りに、関節靭帯は関節の安定性のための保護的な要素を持ち合わせていた。研究結果からは、生理的な運動条件下での靭帯動態は、比較的、一定範囲内の変動に過ぎなかった。しかしながら、関節可動域が広がる

につれて、ひずみデータが増加し、可動域上限に至ってはデータ値が大きく上昇し、靭帯機能としての安定性貢献度が高まった。また、可動域制限には骨性の制限とそれ以外の筋や軟部組織による制限があるが、そのうち、後者の軟部性制限が発生する場面では、特にひずみ値が上昇し、関節可動域に対して制限や安定性に寄与していることが分かった。

以上から、計測対象とした、一般的に主要関節と呼ばれる関節の靭帯においては、生理的な条件下では大きな変動が生じないことが分かり、制限よりもむしろ安定性に寄与することが本実験より証明された。

一方、靭帯損傷の多くは非生理的な動態が生じた場合であることが多いことから、様々な非生理的運動条件における靭帯動態計測も一部行った。この場合、生理的運動条件下では見られないひずみ値の変化が示された。

そこで、ヒトにおいても生理的に加齢に伴って現れる身体現象のひとつである筋萎縮と関節運動の変化の実験モデル作成を検討した。このモデルの目的は、本研究における運動動態の解析として、高齢者でいかなる状態が発生するかを予測することである。

関節動態の計測方法を確立するために、動物実験でラット筋萎縮モデル作成した。ラットの右後脚にギブスを装着することで、下肢筋の萎縮を誘導し、骨と筋量の分析から、筋萎縮モデルによる運動動態計測モデルを構築した。この筋萎縮モデルでは、10日間のギブス固定脚で骨は約5%弱、筋においてはヒラメ筋で約40%強の萎縮が認められた。今後、このモデルが高齢者の運動動態と相関するか高齢ラットを用いて計

測を行うことを予定している。しかしながら、研究期間を終えるために、今後、報告したいと考えている。

また、主要な運動動態の実験結果については、現在、詳細な内容の論文を発表予定である。

本研究に使用させていただいたご遺体は、すべて篤志献体によるものである。篤志献体の取扱については「死体解剖保存法」と「医学及び歯学の教育のための献体に関する法律」（以下「献体法」）の遵守が義務づけられており、本研究では、献体法の範囲内での研究・研究開発を行った。献体者の身体を研究に使用する上での尊厳と生命倫理に対する万全の配慮を行い、貴重なひずみ値データを取得いたしました。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山門 一平 (YAMATO IPPEI)

東海大学・医学部・助教

研究者番号：20328157

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：