

学 位 論 文 題 名

Simultaneous Strain Measurement with determination  
of A Zero Strain reference for the medial  
and lateral Ligaments of the Ankle

(足関節内側外側靱帯の同時ひずみ計測とひずみゼロ基線の決定)

学位論文内容の要旨

足関節の靱帯損傷は頻度の高い外傷であるが、その後に起こる靱帯不全状態に対して従来より優れた靱帯再建術を開発するには足関節靱帯の動態を理解する必要がある。本研究の目的は足関節を連結する内側の三角靱帯と外側の前距腓靱帯、後距腓靱帯、踵腓靱帯の長さ変化量を同時に計測するとともに、各靱帯に抗張力が働き始める“ひずみゼロ”の基線を決定して靱帯の緊張と弛緩のメカニズムを明らかにすることである。

【材料と方法】実験にはヒト新鮮凍結切断肢12肢を用いた。室温にて自然解凍後、足関節の皮膚と腱を切除し、内側の三角靱帯と外側の前距腓靱帯、後距腓靱帯、踵腓靱帯を展開して、まず足関節中間位での各靱帯の長さを電子式ノギスで計測した。足関節の底背屈運動に伴う各靱帯の長さ変化量を計測するセンサには、直径約1mmのシリコンチューブに液体合金であるGa-In (ガリウム-インジウム)を封入したトランスデューサを用いた。このセンサは長さ変化により液体合金であるGa-Inの電気抵抗が変化することを利用したものであるが、その出力の非直線性は1%以下と極めて正確であり、弾性係数は0.02 N/mmと極めて小さく靱帯の生理的運動を妨げない特性を有していた。三角靱帯では浅層の中央を走る脛踵靱帯中央部線維に、外側では各靱帯の中央部線維に沿わせてセンサを埋設し、センサ両端の導線は各靱帯中央線維の起始部と停止部から骨内を貫通する径1.5mmの骨トンネルを通して反対側の骨外に引き出し、金属の圧着端子と裸子で強固に骨表面に固定した。足関節の底背屈の動きは、距退関節と距骨下関節の3次元複合運動であるため3軸の電気角度計を脛骨と踵骨にそれぞれ2本のSteimann pinで固定してモニターした。脛骨と腓骨の近位切断端は腓骨の回旋を妨げないよう新たに開発した回転軸を有する継ぎ手で連結した。前足部を試験台に弾性帯で固定したあと、徒手的に下腿を矢状面で足関節底背屈の最大可動域まで12回繰り返し運動させた。後足部は拘束せず6度の自由度を確保した。足関節底背屈運動に伴う長さセンサからの出力を、電気角度計からの出力とともにアナログ/デジタル変換してコンピュータに取り込み解析し記録した。長さ変化量の計測後、5肢ではChopart関節で足部を切断し、前後脛腓靱帯を切離し、距骨と踵骨を前額面で2つに切断してセンサが埋設されたまま各靱帯を骨-靱帯-骨の連続した単位に4分割した。これらの骨-靱帯-骨単位を、靱帯走行方向が材料試験器の引っ張り方向に一致するように注意して、試験器に固定した。靱帯が完全に弛緩した状態から骨-靱帯-骨単位をゆっくり引き延ばし、ロードセルから出力が始まる長さ、すなわち靱帯に抗張力が働き始

める長さを求め、これを“ひずみゼロ”の基線とした。足関節運動に伴う靱帯のひずみ量は、長さ変化量を靱帯の中間位での長さで除して百分率で表し、足関節中間位を $0^{\circ}$ として底屈 $40^{\circ}$ から背屈 $30^{\circ}$ まで $10^{\circ}$ ごとに平均と標準偏差を求めた。

【結果】中間位での各靱帯の長さは、前距腓靱帯： $19.8 \pm 1.92$  (平均  $\pm$  標準偏差) mm、後距腓靱帯： $23.7 \pm 3.1$  mm、踵腓靱帯： $29.9 \pm 4.24$  mm、脛踵靱帯（三角靱帯浅層中央部）： $27.7 \pm 3.76$  mm であった。前距腓靱帯は底屈すると中間位より伸び背屈すると短縮した。後距腓靱帯と踵腓靱帯は底屈すると中間位より短縮し、背屈すると伸長した。脛踵靱帯は中間位近くが最も伸長し、底背屈に伴って短縮した。足関節最大底背屈に伴う足関節周囲の4靱帯の最大の長さ変化量と中間位長に対する百分率はそれぞれ前距腓靱帯： $1.56 \pm 0.76$  mm と  $7.9 \pm 3.66\%$ 、後距腓靱帯： $1.17 \pm 0.41$  mmと $5.9 \pm 2.37\%$ 、踵腓靱帯： $1.47 \pm 0.65$  mmと $5.3 \pm 2.47\%$ 、脛踵靱帯： $1.50 \pm 0.69$  mmと $5.2 \pm 2.62\%$  であった。

“ひずみゼロ”の基線は前距腓靱帯と脛踵靱帯では足関節の底屈位に、後距腓靱帯と踵腓靱帯では背屈位に位置した。この長さは前距腓靱帯では底屈 $16.2 \pm 2.6^{\circ}$ の長さに相当しこの肢位より底屈すると前距腓靱帯は緊張し、この肢位より背屈すると弛緩することが解った。内側の脛踵靱帯では“ひずみゼロ”の基線は底屈 $9.5 \pm 8.9^{\circ}$ の長さに相当し、この肢位より背屈すると緊張し、底屈すると弛緩することが解った。後距腓靱帯では“ひずみゼロ”の基線は背屈 $18.0 \pm 7.5^{\circ}$ の長さに相当しこの肢位より背屈すると靱帯は緊張し、底屈すると弛緩することが解った。踵腓靱帯では“ひずみゼロ”の基線は背屈 $17.8 \pm 6.4^{\circ}$ の長さに相当し、この肢位より背屈すると靱帯は緊張し、底屈すると弛緩することが解った。

【考察】前距腓靱帯の中央が緊張し靱帯としての機能を発揮するのは約 $16^{\circ}$ 以上の底屈位であり、後距腓靱帯と踵腓靱帯の中央では約 $18^{\circ}$ 以上の背屈位であることが本研究から明らかになった。一方、脛踵靱帯の中央部は中間位近くでもっとも緊張しており、足関節の中間位では外側の靱帯より内側の靱帯が関節を安定させる主な役割を果たしていることが判明した。また、長さ変化のパターンは後距腓靱帯と踵腓靱帯では同様のパターンを示し、これらと前距腓靱帯は逆のパターンを示した。このことは、外側の3靱帯間に役割分担が存在することを示唆している。すなわち、前距腓靱帯が弛緩すると後距腓靱帯と踵腓靱帯が緊張して足関節の安定性を保持していた。このような関係は内側の脛踵靱帯と外側の踵腓靱帯との間にも観察された。

また、足関節の最大可動域における靱帯の長さ変化量は実長では1.6 mm以下、中間位での靱帯長の8%以下と極めて小さいことが判明した。このことは足関節の性質を理解し、解剖学的靱帯再建術を計画する上では重要であろう。

足関節捻挫では前距腓靱帯と踵腓靱帯が最も損傷され易いが、本研究の結果から前距腓靱帯の安定性を評価するには $16^{\circ}$ 以上の足関節底屈位が、踵腓靱帯の安定性を評価するには $18^{\circ}$ 以上の背屈位が望ましいことが示唆された。足関節のストレスX線写真を撮影する際も同様のことが言えよう。また、足関節靱帯損傷の治療において、足関節を中間位にギプスで固定する保存療法の成功率が比較的高いことが臨床的に知られているが、これら2靱帯が足関節中間位で弛緩していることが一つ理由であろう。すなわち、足関節中間位では損傷した靱帯の断端が互いに接触する可能性が高く、強い緊張に曝されないことが靱帯の治癒に有利に働いているのであろう。

【まとめ】足関節中間位では内側の脛踵靱帯が主に緊張し足関節の安定性に寄与していること、底屈位では前距腓靱帯が緊張し、背屈位では後距腓靱帯と踵腓靱帯が緊張し足関節を安定

させていることが明らかとなった。またこれら4靱帯の長さ変化量は足関節の最大底背屈運動においても極めて小さいことが明らかとなった。これらの結果は足関節靱帯の機能を理解し、靱帯再建術を計画する際に有用な情報となろう。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浪 明 男

副 査 教 授 渡 邊 雅 彦

副 査 教 授 安 田 和 則

## 学 位 論 文 題 名

### Simultaneous Strain Measurement with determination of A Zero Strain reference for the medial and lateral Ligaments of the Ankle

(足関節内側外側靱帯の同時ひずみ計測とひずみゼロ基線の決定)

足関節靱帯損傷後の不全状態に対する従来の靱帯再建術には術後の可動域制限や不安定性の再発などの問題があった。これらの問題を解決するためには足関節靱帯の動態を理解し、各靱帯の長さ変化パターンと変化量、各靱帯の相互関係と機能する肢位を明らかにする必要がある。申請者は新鮮凍結切断肢 12 肢を用い、内側の三角靱帯と外側の前距腓靱帯、後距腓靱帯、踵腓靱帯の中央部に直径約 1mm のシリコンチューブに液体合金である Ga-In (ガリウム-インジウム) トランスデューサを埋設し、3 軸の電気角度計で関節の動きをモニターしつつ、足関節に 6° の自由度が確保されるようにして、最大底背屈運動に伴う各靱帯の長さ変化量を計測した。長さセンサからの出力は、電気角度計からの出力とともにアナログ/デジタル変換してコンピュータに取り込み解析し記録した。この計測直後、5 肢では Chopart 関節で足部を切断し、前後脛腓靱帯を切除し、距骨と踵骨を前額面で 2 つに切断してセンサが埋設されたまま各靱帯を骨-靱帯-骨の連続した単位に 4 分割した。これらの骨-靱帯-骨単位を、材料試験器に固定し、靱帯が完全に弛緩した状態からゆっくり引き延ばし、ロードセルから出力が始まる長さ、すなわち靱帯に抗張力が働き始める長さを求め、これを“ひずみゼロ”の基線とした。中間位での各靱帯の長さは、前距腓靱帯： $19.8 \pm 1.92$  (平均  $\pm$  標準偏差) mm、後距腓靱帯： $23.7 \pm 3.1$  mm、踵腓靱帯： $29.9 \pm 4.24$  mm、脛踵靱帯 (三角靱帯浅層中央部)： $27.7 \pm 3.76$  mm であった。

足関節最大底背屈に伴う足関節周囲の 4 靱帯の最大の長さ変化量と中間位長に対する百分率はそれぞれ前距腓靱帯： $1.56 \pm 0.76$  mm と  $7.9 \pm 3.66$  %、後

距腓靱帯： $1.17 \pm 0.41$  mm と  $5.9 \pm 2.37$  %、踵腓靱帯： $1.47 \pm 0.65$  mm と  $5.3 \pm 2.47$  %、脛踵靱帯： $1.50 \pm 0.69$  mm と  $5.2 \pm 2.62$  % との結果を得た。前距腓靱帯は底屈すると中間位より伸び背屈すると短縮し、後距腓靱帯と踵腓靱帯は底屈すると中間位より短縮し背屈すると伸長し、脛踵靱帯は中間位近くが最も伸長し底背屈に伴って短縮した。前距腓靱帯が緊張し機能を発揮するのは  $16^\circ$  以上の底屈位であり、後距腓靱帯と踵腓靱帯では約  $18^\circ$  以上の背屈位で、脛踵靱帯は中間位近くであることが判明した。長さ変化のパターンは後距腓靱帯と踵腓靱帯では同様のパターンを示し、これらと前距腓靱帯は逆のパターンを示した。このことは、外側の 3 靱帯間に役割分担が存在することを示唆している。すなわち、前距腓靱帯が弛緩すると後距腓靱帯と踵腓靱帯が緊張して足関節の安定性を保持していた。このような関係は内側の脛踵靱帯と外側の踵腓靱帯との間にも観察された。

審査にあたり、副査渡邊雅彦教授から、切断肢をバイオメカニカルな研究に用いることの妥当性と限界について質問があった。申請者は、新鮮凍結標本と新鮮標本では靱帯物性に違いがないこと、生体では筋の収縮や体重負荷などの動的要因があるが切断肢ではこれらの再現が難しいことが限界である回答した。続いて、副査安田和則教授から、“ひずみゼロ”の基線を決定することの意義とセンサを設置する上での留意点についての質問があった。申請者は、靱帯の機能を理解する上では緊張と弛緩のメカニズムを理解することが重要であること、センサの設置ではやや伸張した状態で中央繊維に正確に沿わせて埋設することが大切であると回答した。最後に主査三浪明男教授が、靱帯の付着部には一定の大きさがあり靱帯線維の走行も一定ではないが中央部の計測が靱帯の機能を代表していると言えるのか、また底背屈の動きは内外反の動きとの複合運動として捉えるべきではないか、靱帯の性状には個人差があり必ずしも同様ではないのかとの質問を行い、申請者は概ね妥当な回答を行った。

この論文は、足関節を連結する内外側靱帯の長さ変化量を全可動域に渡って同時にかつ精密に計測し、靱帯の緊張と弛緩のメカニズムを明らかにしたはじめての研究である。本研究を契機に開発された靱帯再建術は臨床において優れた成績をあげている。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、本研究後に展開された臨床研究なども併せ申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。