

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650267

研究課題名(和文)音響情報を利用した腱の断裂機序の解明と損傷治癒過程評価のための基礎的研究

研究課題名(英文)Fundamental Study on the Clarification of Rupture Mechanism in Tendon and the Characterization of Damage Healing Process using Acoustic Information

研究代表者

若山 修一(WAKAYAMA, Shuichi)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：00191726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：腱や靭帯に発生する微視損傷は、完全断裂の起点となる一方、腱組織の再生のトリガーになるとも考えられており、微視損傷の検出及び同定を行う技術の開発はリハビリテーションやスポーツトレーニングの最適化に有用である。

本研究では、日本白色家兔から採取した膝蓋骨-膝蓋腱-脛骨複合体の疑似生体環境下(37℃生理食塩水中)で引張試験を行い、微視損傷の発生・蓄積過程をAEモニタリングした。応力は単調に増加し、最大応力以前に多くのAE信号が検出された。また、負荷速度が大きいほど高振幅のAEが検出され、高負荷速度では発生する個々の微視損傷の程度が大きいことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The microdamage of rabbit patellar tendon under static tensile load was detected by AE technique. The damage process of intact and injured tendon was successfully monitored. It was found that the higher amplitude AE signals were detected before the maximum stress under the higher loading rate. It was then suggested that larger scale of microdamages, such as bundles of fibers, ruptured simultaneously under the higher loading rate. AE source location was corresponded with the area where the local strain increased. Consequently, the fundamental insights for the damage monitoring technique which are indispensable for the optimization of programs of sports training or rehabilitation are obtained.

研究分野：生体力学、材料評価工学

科研費の分科・細目：人間医工学 医用生体工学・生体材料学

キーワード：腱 微視損傷 アコースティック・エミッション AE位置評定 損傷治療

1. 研究開始当初の背景

腱は筋と骨を結合する強靱な結合組織性線維束である。腱に過大な負荷がかかると完全断裂を生じるが、微小な繊維の断裂が蓄積しているとその危険性は増す。腱や人体の機械的挙動は多くの研究者によって明らかにされている。一方、靭帯の断裂過程でのアコースティック・エミッション(AE)計測は英・Aberdeen大学のAzangweらによる報告がある。しかしながら、微小な部分断裂を同定し、完全断裂に至る過程を力学的に解明した例は見られない。本研究は、腱の部分断裂から完全断裂に至る過程をAE法によって評価し、腱の断裂機序を解明することを通して、治療過程における運動の開始時期や強度の最適化など、音響診断の臨床への応用の可能性を明らかにすることを目的としている。

2. 研究の目的

腱は筋肉と骨を繋ぐ丈夫な組織であるが、スポーツ時のアクシデントや交通事故の際に、過大な負荷が作用することで完全断裂や部分的な損傷が発生し、運動機能の低下が引き起こされる。また、力学的負荷によって腱に発生する損傷は、腱の成長や治療にも関与しており、その発生過程を明らかにすることは、事故における損傷の危険性の予測だけでなく、スポーツトレーニングやリハビリテーション工学などの各分野にも寄与するものと考えられる。

これまで、腱や靭帯の部分損傷に関しては、破断強度のひずみ速度依存性や、部分損傷が腱の力学的特性に与える影響などについて報告されている。しかしながら、破断強度の低下を引き起こす腱組織の損傷について、力学的知見に基づく十分な検討は行われていない。

そこで本研究では、家兔膝蓋腱に対して種々のひずみ速度で引張試験を行った。その際に、損傷を高感度に検出し、その発生時刻・位置を知ることができるアコースティック・エミッション法(AE法)を用いて損傷の発生・蓄積過程をモニタリングし、評価することで、リハビリテーションなどの運動中に生じる腱損傷を早期に発見する技術を開発するための基礎的知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 供試体

本研究では、日本白色家兔の後肢から摘出した、膝蓋骨-膝蓋腱-脛骨複合体を試料として用いた。摘出した膝蓋腱は、実質部の幅方向における両側をそれぞれ切り取り、中央部約3分の1を試験に用いた。試料は断面積を測定した後、生理食塩水に浸したガーゼで包み、冷凍保管した。

試験に際しては、室温の生理食塩水中に2時間静置して解凍し、脛骨前部、膝蓋骨上部にAEセンサ(共振型、共振周波数400kHz)

を接着した。その後、脛骨と膝蓋骨をそれぞれアルミニウムパイプ中にポリメチルメタクリレート(PMMA)を用いて固定した。これらの加工を行い、試料を試験機に取り付けるまでの間、生理食塩水に浸したガーゼで試料を包み乾燥を防いだ。また、腱実質部表面の変位計測用のマーカーとして、試験前に腱実質部表面に黒色染料を噴霧した。

3.2 引張試験

本研究では試験中の腱への負荷方向を実際の家兔の生体内での条件に近づけるため、脛骨側のアルミニウムパイプを45°傾けて試験機に取り付けた。図1に試験装置と試料の取り付け方向の概要を示す。

試験は擬似生体環境として、37°Cに保たれた生理食塩水中で行った。試験前に試験条件を揃えるために0.5Nの予負荷をかけ、10分間クロスヘッドを保持した。その後、試料が破断するまで種々の速度(0.1, 1, 10, 100 mm/min.)にて引張負荷を加えた。試験中、腱の付着する膝蓋骨および脛骨に直接接着した共振型AEセンサを用いてAE信号を計測した。AE計測条件は、しきい値32μV、プリアンプゲイン60dB、測定周波数帯域100~700kHzとした。試験後、試料を撮影した画像に対してデジタル画像相関法(DIC法)を用いて解析し、腱実質部表面の変位を求めた。

また、AE位置標定を行うため、予負荷中に波の伝播速度の測定を行った。まず、ファンクションジェネレータを用いて膝蓋骨側のAEセンサから試料中へと縦波を入力し、脛骨側のセンサで検出することで伝播時間を求めた。その後、センサ間距離を伝播時間で除して膝蓋骨-膝蓋腱-脛骨複合体の平均伝播速度を算出した。予備試験から、伝播速度は試験中ほとんど変化しないことがわかっていく。

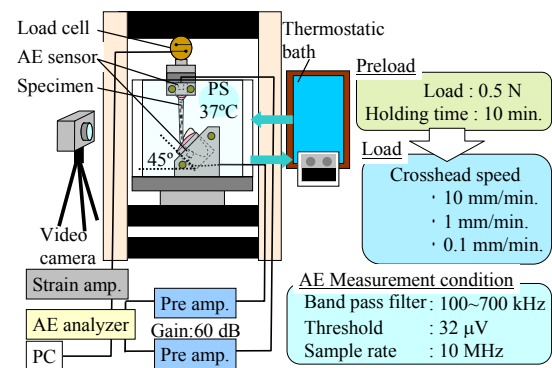


図1 試験装置と試料の取り付け方向

4. 研究成果

4.1 引張試験結果

試験は各速度にて5本ずつ実施した。得られた試験結果の最大応力と負荷速度の関係を図2に示す。これより最大応力は負荷速度

が大きくなるにつれて大きくなり、値のばらつきも増大した。一方でひずみには統計的に有意な差は認められなかったが、ひずみ速度が大きくなるにつれて小さな値をとる傾向が見て取れる。これらは腱の主な構成要素であるコラーゲンに起因する粘弾性挙動の影響と考えられる。

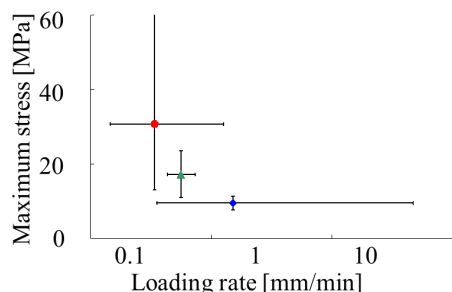


図2 最大応力と負荷速度の関係

次に、試験結果の一例（負荷速度 100 mm/min.）を図3に示す。横軸に時間を、縦軸に応力、AE信号の振幅および累積AEエネルギーを示した。試験開始後、応力は単調に増加し、200秒付近で最大値に達した。AE信号は最大応力に達する前から検出されていることが見て取れる。同様の挙動は全ての負荷速度において見られ、引張負荷下の腱には最大応力に達する前から微小な損傷が発生していることが示唆された。

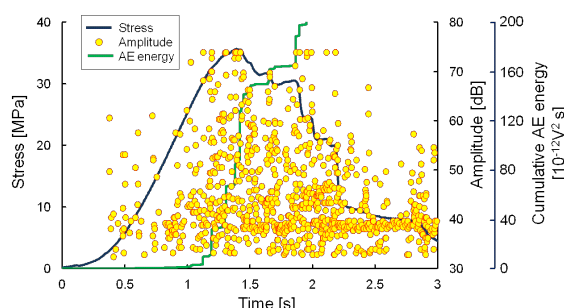


図3 引張試験中のAE発生挙動

4. 2 AE位置標定と局所ひずみ

引張試験の際には、予負荷中に測定した供試体ごとの音速（750~800 m/s）と2ch間のAE信号の到達時間差から、音源（=微視損傷）の1次元AE位置評定を行った。その結果、多くの場合、中央から膝蓋骨側に多くの信号の音源が同定された。それぞれの試験片ごとに、AE位置評定結果とDIC法を用いて算出した試料表面のひずみ挙動を比較したところ、局所的に大きなひずみが生じた領域とAE源の集中している位置はよく一致していた。したがって、AEで検出された微視損傷は腱の耐荷能力の劣化を生じるクリティカルなものであることが理解される。

以上の結果から、本研究では国内外を通して初めてとなる生理食塩水中での腱の引張

試験の際に発生する微視損傷をAE法で検出することに成功し、腱の損傷の早期診断やリハビリテーションやスポーツトレーニングにおける運動プログラムの最適化に寄与する知見が得られたと結論できる。

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）

〔雑誌論文〕(計 1件)

- 1) Takenobu SAKAI, Satomi SUZUKI, Shuichi WAKAYAMA, Satoru YONEYAMA and Ei YAMAMOTO, Characterization of Damage Process of Rabbit Tendon by Acoustic Emission Technique in Vitro, 2013 Special Issue of Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 13, pp.s213-s216, 2013
- 2) Satomi SUZUKI, Takenobu SAKAI, Shuichi WAKAYAMA and Ei YAMAMOTO, AE Monitoring of Damage Process of Rabbit Patellar Tendon under Various Strain Rate, Progress in Acoustic Emission, Vol. 16, pp.79-84, 2012

〔学会発表〕(計 7件)

- 1) Shuichi WAKAYAMA, [PLENARY LECTURE] Materials Characterization Based on Acoustic Emission Technique –What can be identified by acoustic emission?, XXV Mexican Polymeric Society Congress, Merida, (2012-12)
- 2) Takenobu SAKAI, Satomi SUZUKI, Shuichi WAKAYAMA, Satoru YONEYAMA and Ei YAMAMOTO, Characterization of Damage Process in Rabbit Tendon by Acoustic Emission Technique, 7th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Taiwan, (2012-11)
- 3) Satomi SUZUKI, Takenobu SAKAI, Shuichi WAKAYAMA and Ei YAMAMOTO, AE Monitoring of Damage Process of Rabbit Patellar Tendon under Various Strain Rate, 21th International Acoustic Emission Symposium, Naha, (2012-11)
- 4) 鈴木 仁己, 坂井 建宣, 若山 修一, 山本 衛, 種々のひずみ速度下における家兎膝蓋腱の損傷過程のAE法による評価, 日本機械学会2012年度年次大会, 金沢, (2012-09)
- 5) 鈴木 仁己, 坂井 建宣, 若山 修一, 山本 衛, 家兎膝蓋腱の疑似生体環境下における損傷挙動のAE法による評価, 日本機械学会関東支部総会第19期総会講演会, 八王子, (2013-03)
- 6) Shuichi WAKAYAMA, Satomi SUZUKI, Takenobu SAKAI and Ei YAMAMOTO, AE Monitoring of Damage in Rabbit Tendon under Tensile Loading, 55th Acoustic

Emission Working Group Meeting, Anaheim,
(2013-6)

- 7) 坂井 建宣, 鈴木 仁己, 若山 修一,
山本 衛, 引張負荷を受けた家兎膝蓋腱
の損傷過程の AE 法による評価, 日本非
破壊検査協会 平成 25 年度春季講演大
会, 東京, (2013-06)
- 8) 若山 修一, 松岡 史都, 鈴木 仁己, 坂井
建宣, 山本 衛, 疑似生体環境下での引張
負荷による家兎膝蓋腱の損傷の AE モニ
タリング, 第 40 回日本臨床バイオメカニ
クス学会, 神戸, (2013-11)

6. 研究組織

(1)研究代表者

若山 修一 (WAKAYAMA, Shuichi)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 00191726

(2)研究分担者

山本 衛 (YAMAMOTO, Ei)
近畿大学・生物理工学部・准教授
研究者番号: 00309270

坂井 建宣 (SAKAI, Takenobu)
首都大学東京・理工学研究科・助教
研究者番号: 10516222