

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500399

研究課題名(和文) 画像相関法を用いたひずみ解析による皮質骨の拡散性微小損傷の進展評価

研究課題名(英文) Evaluation of Microscopic Bone Damage and Strain Distribution Using Image Correlation Techniques

研究代表者

菊川 久夫 (KIKUGAWA HISAO)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：50246162

研究成果の概要(和文)：骨折時のき裂の発生とその伝播は、骨の損傷組織との関連で動的に変化すると考えられるため、それらを考慮した評価が必要である。本研究では、骨の微視損傷とひずみ分布との関係を明らかにするため、デジタル画像相関法を用いて骨組織表面のひずみ分布の解析を試みた。画像相関法によるひずみ解析により、試験片のスリット先端近傍におけるひずみ量の増大を可視化することができた。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to evaluate crack initiation and propagation after fracture because this process may be different in the case of injured bone tissues. In this study, we attempted to analyze the strain distribution on bone tissue surface by using image correlation techniques in order to elucidate the relationship between microscopic bone damage and strain distribution. A strain analysis performed using image correlation techniques allowed the visualization of the increased strain at the forward end of the slit of the specimens.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：総合領域

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：生体物性、皮質骨、破壊じん性、画像相関法、リモデリング

### 1. 研究開始当初の背景

骨格系でも主に体重を支持する骨組織は、日常的に力学的環境にさらされ、骨内には常に内部ひずみが発生している。骨組織に加わる比較的ゆっくりとした静的負荷は骨表面でのリモデリングを活性化させ、また、繰り返しの負荷は内側皮質のリモデリングを活性化するとされている。これらの違いは、力学的刺激の加わる速度(ひずみ速度)により骨組織内を伝搬する微小き裂挙動の相違が生じるものと予想される。特に、微小損傷の

生成-集積-連結過程が骨内に生じる局部的ひずみ場形成に関与していると推測されるため、骨のリモデリング活動を把握するためには、骨のひずみ分布の正確な把握が不可欠であると申請者は考えている。

このひずみ分布はストレインゲージを用いて測定するのが一般的である。しかし、ゲージの大きさより小さな領域は測定できず、また、原理上材料表面に貼り付けたゲージが材料の変形に追従しているのか、材料自身の変形に影響を与えてはいないかなどの問題

が残る。そこで、デジタル画像をコンピュータで計算することにより、ひずみ分布を測定する方法が Peters(1982)や Sutton(1983)らによって考案された。材料表面に付与されたランダムなパターンを利用して、そのパターンを追跡し、ひずみ分布を測定する方法で、画像相関法と呼ばれている。この方法だと、材料の表面に現れるひずみ分布を比較的簡単かつ安価に測定することができる。臨床の場合においては、非侵襲的 (in vivo) に画像診断よりひずみ分布を見積もることができれば、各種骨疾患や、骨折の予知あるいは治癒過程において、診断に有力な情報となり得る。

以上の背景より、本研究の全体構想は、骨組織のひずみ挙動ならびに微小損傷の進展挙動との関連を明らかにし、これらが骨のリモデリング活動に与える影響を調べることにある。

## 2. 研究の目的

本研究では、骨損傷の進展挙動とひずみ分布との関係の定量化、ならびに測定したひずみ分布が破壊特性に与える影響について検討する基礎的段階として、骨組織表面に現れるひずみ分布の可視化を試みた。

具体的には、ウシ大腿骨骨幹部皮質骨の三点曲げ破壊じん性試験中に発生する微小損傷の進展の様相を高速カメラにより撮影し、開発したデジタル画像相関法にもとづく解析システムを用い、ひずみ分布の測定を行った。また、中性緩衝ホルマリン、エタノール、生理食塩水の3種類の保存液中で皮質骨を保存した場合、骨のひずみ分布に与える保存の影響について、統一的試験方法により調査を行った。

## 3. 研究の方法

デジタル画像相関法(以降、画像相関法と略す)は、被測定物表面に存在するパターン、あるいはスプレー塗料などで付与したランダムパターンを利用して変位量を測定する方法である。一般的にグレースケールと呼ばれるデジタル画像は、256階調(8bit)の輝度値として表現される画素(pixel)から構成されている。ここで変形前の画像において、任意の位置を中心とする小さな画像領域を考える。画像領域は輝度値をもった画素から構成されているため、これらの値を利用して、変形後の画像上でこの位置がどこに移動したかを探索することで物体上の変位を算出する。

骨試料には、静的引張および圧縮特性が人間の皮質骨に近い生後 24 ヶ月の食用ウシ大腿骨骨幹部皮質骨を用いた。骨は屠殺・摘出後直ちに購入した。

骨試料は、長さ約 100mm の中央骨幹部を

上下に2分割し、それぞれの部分から、前方、内側、外側に分布する板状骨(Plexiform bone)を採取した。なお、後方に分布するハバース骨(Haversian bone)についても Plexiform boneと同様に試験片を作製したが、Plexiform boneとは骨の構造が異なるため、本実験の対象からは除外した。

本実験で用いた全ての試験片は、ASTM E399-90 にできる限り準拠して作製した。試験片の寸法は試験片幅  $W=8\text{mm}$ 、長さ  $L=40\text{mm}$ 、板厚  $B=4\text{mm}$  である。スリットは骨の横断面に対して円周方向と一致させ、 $a=4\text{mm}$  となるように、幅  $1.2\text{mm}$ 、先端角  $30^\circ$ 、先端半径が  $0.05\text{mm}$  のメタルソーを用いて導入した。

破壊じん性試験片は ASTM E399-90 にできる限り準拠して作製した。試験にはインストロン型材料試験機(負荷容量 1kN)を用いて、負荷速度  $1\text{mm/min}$ 、支点間距離  $S=32\text{mm}$  とし、破断に至るまで試験片に負荷を与え、得られた荷重-変位関係より破壊じん性値を算出した。

## 4. 研究成果

図1に破壊じん性試験で得られた荷重-変位曲線の一例を示す。 $w=0.2\text{mm}$  近傍までは、荷重-変位線図の形状に、各群間で明確な差違は認められず、直線的な形状であった。Control 群においては、破壊直前に若干傾きが小さくなり、塑性変形または安定破壊と思われる非線形部分が観察された。これは、コラーゲン線維や血管などの微細構造が介在物となり、き裂の進展が阻害されるブリッジング効果が発現し、き裂抵抗を変化させたものと考えられる。その後、最大荷重発生の後、不安定破壊を生じた。ホルマリン群以外の保存群においては、Control 群とほぼ同様の荷重-変位関係を示した。

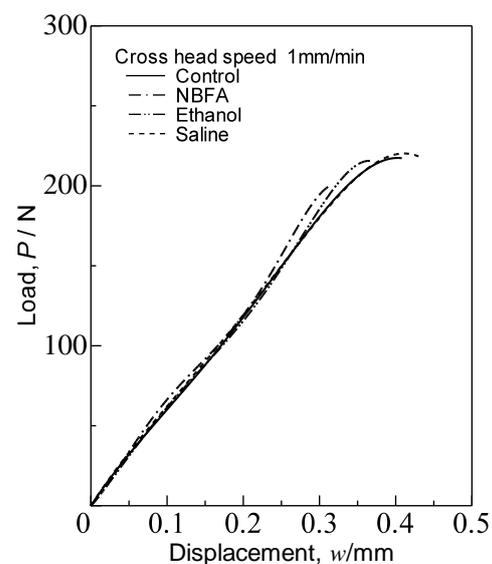


図1 荷重-変位関係

一方、ホルマリン群では、破断直前の傾きの減少傾向を示すことなく最大荷重とともに不安定破断を呈した。これは、ホルマリンに含まれるホルムアルデヒドによりコラーゲン線維や血管などのたんぱく質成分が変性して硬化したために粘弾性的効果が阻害され、本来有するブリッジング効果が喪失したためと考えられる。なお、本研究では、破断時の最大荷重を用いて破壊じん性値  $K_Q$  を算出した。

図2には保存方法の差による  $K_Q$  値の変化を示す。縦軸の変化率は、保存群と Control 群との平均  $K_Q$  値の差を Control 群の平均  $K_Q$  値で除して算出した。ホルマリン群の  $K_Q$  値は、Control 群に比較して約 18% 統計学的に有意に低下した。この原因としては、骨中のコラーゲン線維などの軟部組織がホルムアルデヒドにより硬化・脆化したことによるものと考えた。これに対して、生理食塩水、エタノールの各保存群において、Control 群に対する統計学的に有意な変化は認められなかった。そこで以下では、 $K_Q$  値が有意に低下したホルマリン保存群のひずみ測定結果について検討する。

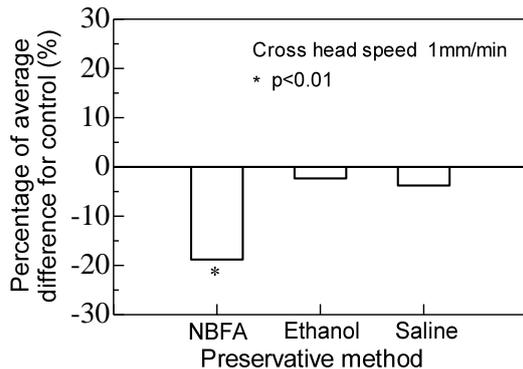


図2 各種保存方法による破壊じん性の変化

図3に破断時直前のひずみ成分の分布を示す。図3(a)の画像は Control 群、図3(b)の画像はホルマリン群の一例を示しており、上段より  $x$  軸方向の垂直ひずみ  $\epsilon_x$ 、 $y$  軸方向の垂直ひずみ  $\epsilon_y$ 、せん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  を示している。

本測定結果は、き裂様式がモード I の変形状態であるため、 $\epsilon_x$  が支配的なひずみ分布となっており、Control 群とホルマリン群のひずみ分布上の差も確認できる。また、破壊部位と同様の位置で  $\epsilon_x$  と  $\gamma_{xy}$  の集中が確認された。よって、得られたひずみ分布は理論的に妥当なものと考えられる。

実験に用いた試験片は、荷重方向に直交して配向するコラーゲン線維を有するため、スリット先端において、き裂の進展を阻害する因子となり得る。そこで、スリット先端に位置する  $\epsilon_x$  値と変位  $w$  の関係を図4に示す。全体的にひずみは Control 群がホルマリン群よ

り大きく、その割合は変位の増加とともに大きくなっている。また、両群共に  $w=0.2\text{mm}$  までは直線的な変化の傾向を示した。この傾向は、図1に示す荷重-変位関係とよく一致している。Control 群に関しては、微小損傷の発生挙動ともよく対応しており、ひずみの増加が顕著に現れ始める  $w=0.2\text{mm}$  近傍で微小損傷が発生していると推測される。さらに、 $\epsilon_x$  と  $w$  の関係は  $w$  が増加すると下に凸の曲線を呈し、特に、Control 群のひずみは指数関数的に増加した。なお、ホルマリン群においては、コラーゲン線維などの脆化により比較的低いひずみで破断したものと考える。

皮質骨の主成分であるコラーゲン線維とハイドロキシアパタイトの引張強度はそれぞれ、16.8MPa と 6.9MPa であるとされている。そのため、数値的には引張荷荷に対しては、コラーゲン線維が寄与していることがわかる。したがって、本実験においては、ハイドロキシアパタイトよりも、むしろコラーゲン線維がき裂進展に対する抵抗となり、スリット先端の  $\epsilon_x$  分布に影響を与えると推測する。

さらに、破断時の  $\epsilon_x$  値は Control 群で 11.9%、ホルマリン群で 2.95% であった。すなわち、ホルマリン群の  $\epsilon_x$  値は Control 群に比較して約 75% 統計学的に有意に低下した。この結果、皮質骨のひずみ特性は破壊じん性に比較して、化学固定の影響を顕著に受けやすいことが本計測より判明し、骨組織のひずみ評価の際には特に注意を要するといえる。

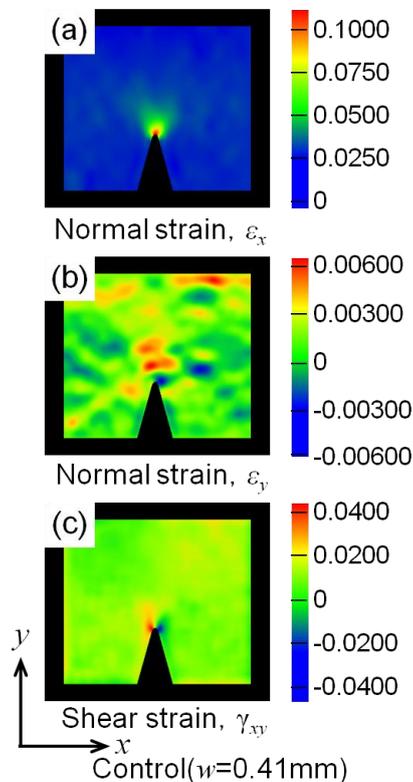


図3(a) 解析結果(対照群)

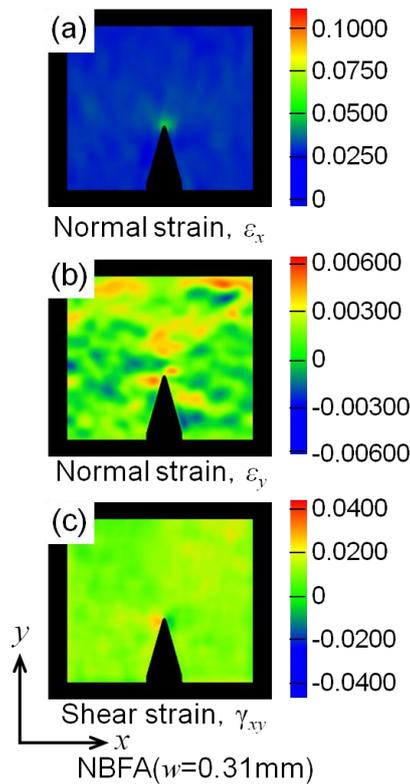


図 3(b) 解析結果(保存群)

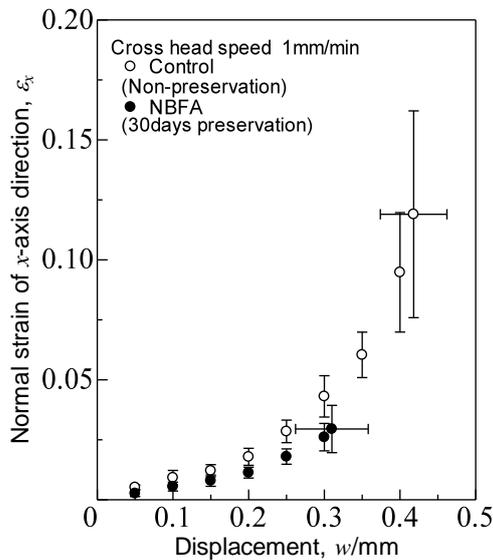


図 4 ひずみ-変位関係

図 1 で指摘したように、本測定では破断直前に進展する安定き裂のため、スリット先端においてひずみを高く見積もった可能性がある。しかし、ウシ皮質骨のコラーゲン線維(脱灰骨)引張試験に対する極限ひずみは 7% から 13% 程度である。この値は本手法により測定された Control 群の破断時のスリット先端の  $\epsilon_x$  値とほぼ同程度であった。

以上の結果より、開発したデジタル画像相

関法にもとづく解析システムを用いることで、本研究の目的に応じたひずみ分布の計測が可能であると考えられる。

ただし、本測定により得られたひずみ分布は、試験片の表面におけるひずみ分布である。複雑な組織構造を有する骨の場合には、試験片の板厚方向にもひずみが増加すると予想される。また、試験片の板厚によっては、破壊じん性の値も変化する。本研究においては、同一形状の試験片を用いて実験を行っているため、試験片表面のひずみ分布に与える保存処理の影響を明確化することができた。しかし、骨の破壊じん性とひずみ分布との対応を考察するためには、スリット先端近傍における内部のひずみ分布の把握が重要である。よって、まず平面ひずみあるいは平面応力のいかなる状態で骨の破壊が生じたのかを調べるために、試験片の板厚変化による破壊じん性評価と、骨の組織構造を考慮した有限要素法によるモデル解析を併用して、内部のひずみ分布の推定を現在検討している。

本研究では、皮質骨の微視損傷とひずみ分布との関係を明らかにするため、デジタル画像相関法を用いて、破壊じん性試験中の保存処理された皮質骨試験片表面のひずみ分布の解析を試みた。

その結果、デジタル画像相関法に基礎を置く本開発システムは、スリット先端近傍におけるひずみ分布とひずみ集中部位の明確な可視化に成功した。特に、皮質骨のひずみは破壊じん性に比較して、化学固定の影響を顕著に受けやすいことを見出し、骨組織のひずみ測定上注意を要することを指摘した。問題点として指摘したスリット先端近傍における内部のひずみ分布の推定については、本測定手法と有限要素解析を併用した評価手法の確立が必要である。

今後は、上記の問題点を踏まえた上で、本測定により得られたひずみデータより、主ひずみとその方向、最大せん断ひずみなどを評価し、皮質骨の微小損傷拡大における指向性や応力拡大係数について検討する予定である。

臨床の場において、本手法により非侵襲的 (In Vivo) に CT や MRI より得られた画像から骨内のひずみ分布を見積もることができれば、各種骨疾患や、骨折の予知あるいは治療過程において、診断に有力な手段となり得ると考えている。

## 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 2 件)

- ①山口 齊, 菊川久夫, 浅香 隆, 粕谷平和, 國則正弘, 画像相関法を用いた皮質骨のひずみ分布測定と破壊じん性, 日本金属学会

誌, 査読有, 第 74 卷, 2010, 214-220

- ②Hitoshi Yamaguchi, Hisao Kikugawa, Takashi Asaka, Hirakazu Kasuya and Masahiro Kuninori, Measurement of Cortical Bone Strain Distribution by Image Correlation Techniques and from Fracture Toughness, Mater. Trans. Vol. 52, 査読有, 2011, 1026-1032

〔学会発表〕(計 1 件)

- ①山口 斉, 菊川久夫, 浅香 隆, 粕谷平和, 國則正弘, 画像相関法を用いた皮質骨のひずみ分布測定と破壊じん性, 日本金属学会 2009 年秋期 (第 145 回) 大会 (2009 年 9 月), 京都大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菊川 久夫 (KIKUGAWA HISAO)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号: 5 0 2 4 6 1 6 2

### (2) 連携研究者

浅香 隆 (ASAKA TAKASHI)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号: 5 0 2 6 6 3 7 6