

正 ○ 張 月琳 (北大)
正 東藤 正浩 (北大)

正 山田 悟史 (北大)
正 但野 茂 (北大)

Yuelin ZHANG, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo

Satoshi YAMADA, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Masahiro TODOH, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Shigeru TADANO, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Key words : Collagen Degeneration, Bovine Cortical Bone, Elastic and Viscous Moduli, Free Vibration

1. はじめに

長寿化に伴い、骨粗鬆症に代表される骨疾患が急増している。そのため、骨組織の力学的特性を詳細に研究することが重要である。特に臨床的には、骨の健康状態と骨折のリスクを評価するために、骨組織の弾性と粘性特性を明らかにすることが求められている。これまで、骨組織の材料物性に関しては、巨視的なレベルでは圧縮試験⁽¹⁾、引張試験⁽²⁾及び曲げ試験⁽³⁾が行われており、微視的なレベルではナノインデンテーション⁽⁴⁾が行われている。以上のアプローチによって、骨組織の材料物性が明らかにされつつあるが、複雑な実験機構や測定技術が要求される。また、動的応答に関しては、超音波⁽⁵⁾、共振加振器⁽⁶⁾やインパルス加振⁽⁷⁾等の実験が行われ、骨全体の固有振動数も明らかにされているが、骨の力学特性との関係はまだ明らかにされていない。

本研究では、片持ちばりの自由振動特性により骨組織のバネ定数・粘性係数を同時に計測する手法を考案する。考案した手法を用いて、熱処理によってコラーゲンを変性させた骨組織の弾性・粘性特性を計測し、コラーゲン変性による影響を検討する。

2. 実験方法

2.1 試験片

約 23 か月齢のウシ大腿骨骨幹部の皮質骨より短冊状の試験片を採取した。試験片のサイズは、長さ(l)が 15.0mm、幅(b)が 2.0mm および厚さ(h)が 1.0mm とした。試験片の長さ方向は大腿骨骨軸方向とした。大腿骨の骨幹部の 4 つの部位 (anterior, medial, posterior と lateral) より 8 本ずつ試験片を採取した。

2.2 煮沸実験

皮質骨のコラーゲン変性による皮質骨の弾性・粘性特性の影響を検討するため、100℃の蒸留水において試験片を煮沸した。煮沸時間を 12, 24 と 36 時間とした。また、ここで煮沸せず室温の蒸留水中にて湿潤状態に保った試験片を 0 時間とした。大腿骨の骨幹部の 4 つの部位より 2 本ずつ、各試験条件において計 8 本の試験片を用いた。

2.3 片持ちばりの自由振動試験

実験系の概要を図 1 に示す。試験片の一端を固定、他端を自由にした片持ちばりとして治具に設置した。自由振動させるために、自由端の y 方向に 0.20 ± 0.02 mm の変位を与えた。自由端の y 方向の変位をレーザ変位計を用いて計測した。レーザ変位計のサンプリング周波数は 50kHz、変位分解能は $0.05 \mu\text{m}$ とした。また、自由振動実験は、温度と湿度がそれぞれ 20-30℃ と 30-50% の環境において、空気中で行った。

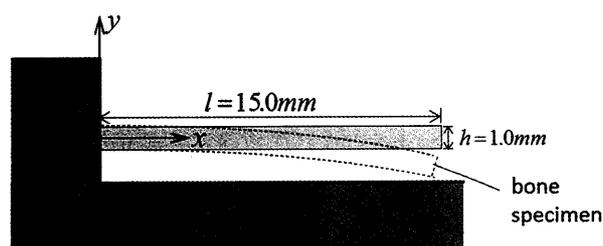


Fig.1 Outline of free vibration experiment

3. 骨試験片の弾性・粘性特性の導出

骨試験片の振動特性を求めるために、図 1 の片持ちばりの曲げ自由振動系を、図 2 に示すように自由端に質点があり、その質点を並列なバネ・ダンパ (Kelvin-Voigt Model) によって垂直支持されている力学系と等価であると仮定する。このとき、実験系の固定端は単純支持とする。

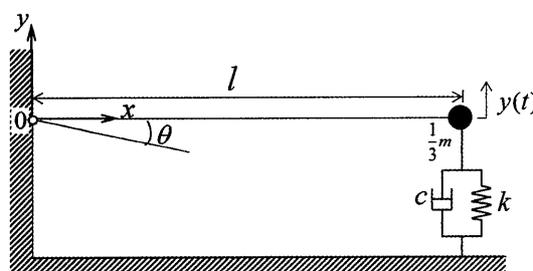


Fig.2 Mass-spring-damper model of rotational vibration

図 2 の片持ちばりの質点-バネ・ダンパ系モデルの運動方程式は式(1)となる。

$$J\ddot{\theta} + c l^2 \dot{\theta} + k l^2 \theta = 0 \quad (1)$$

ここで、 J :慣性モーメント、 θ :回転角、 l :試験片の長さ、 c :粘性係数、 k :バネ定数である。

慣性モーメント J は式(2)となる。

$$J = \frac{1}{3} m l^2 \quad (2)$$

ここで、 m :試験片の質量である。

回転たわみ角 θ は微小の時、 $\tan \theta \cong \theta = y(t)/l$ となり、式(3)が得られる。

$$\frac{m}{3} \ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = 0 \quad (3)$$

式(3)が式(1)の回転系運動方程式を垂直変位系運動方程式に変換したことになる。ここで、式(3)の一般解を式(4)と仮定する。

$$y(t) = y_0 e^{-At} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

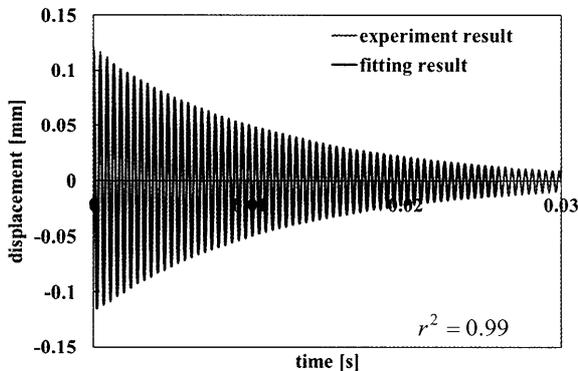
ここで、 y_0 :自由端の最大振幅、 A :減衰係数、 ω :角振動数、 φ :位相角である。

式(4)及び1階、2階微分した式を式(3)に代入すると式(5)が得られる。

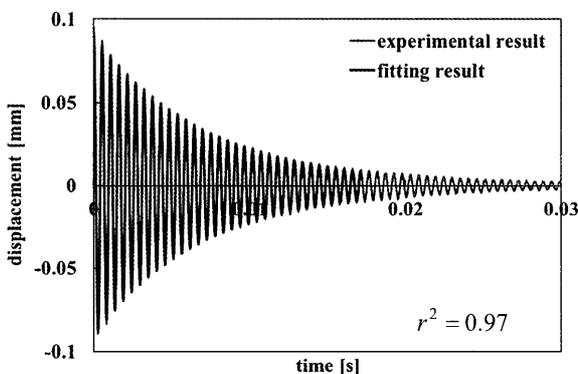
$$\begin{cases} k = \frac{m}{3}(A^2 + \omega^2) \\ c = \frac{2}{3}mA \end{cases} \quad (5)$$

4. 結果及び考察

自由振動試験で測定された片持ちばりの自由端の変位の例を図3に示す。得られた変位を式(4)を用いて近似し、減衰係数 A と角振動数 ω を同定した。図3において、実験で計測した変位をグレー、近似線を黒で示している。図3の結果より、煮沸していない試験片(図3(a))に対して、36時間煮沸した試験片(図3(b))のほうが、角振動数が小さくなり、減衰が大きくなったことが示され、煮沸により試験片の振動特性の変化を測定することができたと考えられる。



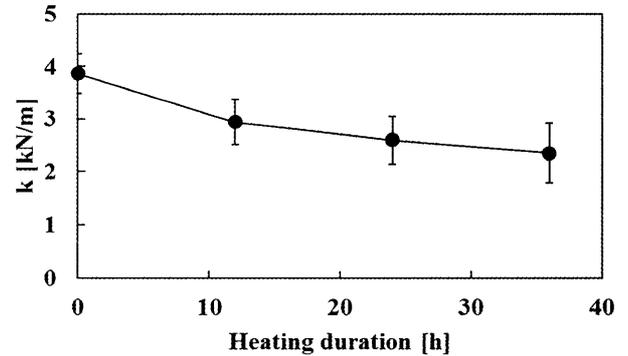
(a) heating duration = 0 h



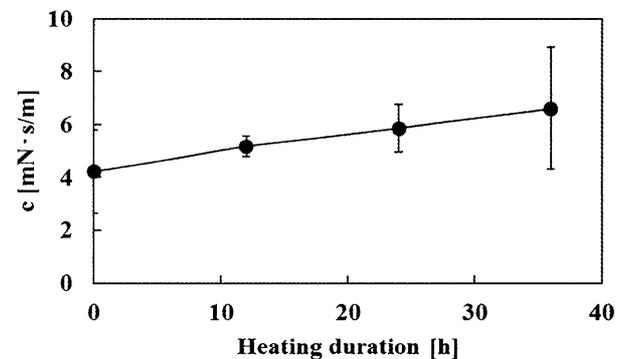
(b) heating duration = 36 h

Fig.3 Examples of displacement obtained at the free end of cantilevered specimens.

式(5)を用いて、各試験片のバネ定数 k と粘性係数 c を算出した結果を図4に示す。バネ定数は煮沸時間が長くなるにつれ減少し(図4(a)), 粘性係数は増加する(図4(b))傾向を示した。



(a) relationship between heating duration and spring constant



(b) relationship between heating duration and viscous damping coefficient

Fig.4 Relationship of heating duration and spring constant, viscous damping coefficient measured from free vibration experiment. Error bars represent S.D..

5. まとめ

本研究では、片持ちばりの自由振動特性を用いて骨組織の弾性・粘性特性を同時に計測する手法を考案した。考案した手法を用いて熱処理した骨組織の弾性・粘性特性を計測し、コラーゲンの変性による影響を検討した。その結果、煮沸によるコラーゲンの変性により弾性特性の減少、粘性係数の増加が確認された。よって、本提案手法を用いて骨組織の粘弾性特性を検出することが可能であることが示唆された。今後は脱質や脱灰の試験片、並びに異なる温度での熱処理の試験片に対して計測を行い、弾性・粘性特性への影響を検討する予定である。

参考文献

- (1) Huijie Leng *et al.*, *J. Biomech.*, 42-4, 491-497,2009
- (2) Kotha *et al.*, *J. Biomech.*, 36, 1683-1689,2003
- (3) Vincent Ebacher *et al.*, *Bone*, 40-5, 1265-1275,2007
- (4) Bala *et al.*, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 4-7, 1473-1482, 2011
- (5) Lee *et al.*, *Biomech. Model. Mechanobiol.*, 1,165-175,2002
- (6) Alizad *et al.*, *J. Biomech. Eng.*, 128, 300-308,2006
- (7) Christopoulou *et al.*, *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 41, 891- 897, 2006.