Article

Variation in Mechanical Properties of Rat Vertebrae with Age and Their Relation to Bone Density

Yoshio SHIRASAKI*, Ikuo AIDA**, Tetsuya TATEISHI***, and Kazuhiko HAYASHI*

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Namiki 1-2 Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0044, Japan

**Department of Orthopedic Surgery, University of Tsukuba, Tennodai 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0044, Japan

***Faculty of Mechanical Engineering, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Aging effect on the mechanical properties and bone density of the rat cervical and lumbar spine were evaluated from young to old specimens. The dynamic viscoelastic properties were measured by a viscoelastic spectrometer. The static test was performed with an Instron-type universal testing machine. We examined dynamic stiffness, $\tan\delta$, fracture load, ultimate strength, and deformation energy of the cervical and lumbar spine over several period of the time. Bone mineral content was measured by dual X-ray absorptiometry at the femoral diaphysis, femoral distal and lumbar 3(L3). The dynamic stiffness and $\tan\delta$ without the soft tissue around lumbar spine indicated a second order polynomial function of age, but cervical spine showed no clear trend with age. Fracture load of the cervical and lumbar spine indicated a second order polynomial function of age. We also found linear relations between the mechanical properties and density of bone.

加齢によるラット骨の力学特性と骨密度の変化

白崎 芳夫*¹, 会田 育男*², 立石 哲也*³, 林 和彦*¹

(原稿受理: 2002年2月1日)

1. 緒 言

ヒトの運動機能は大部分, 筋・骨格系の働きに依存している。骨格系の中でも身体の中軸をなす, 脊柱の加齢による力学特性と骨密度変化を明らかにすることは, 生物学的, 臨床医学的にも重要な意味をもっている。

本報告では, 脊柱の力学特性と骨密度の年齢依存性を明らかにする目的で, 実験動物(ラット)の頸椎と腰椎を用いて力学特性の変化を測定し, 同一試料の大腿骨および腰椎の骨密度を調べた結果について述べる。

2. 実 験

本実験に用いたラット(Wistar-Kyoto Rat)は, 生後3週より飼育し, 5週から98週齢まで測定した。各グループの試料数は $n=6\sim8$ 個体である。

脊柱は新鮮屍体より採取した後, 椎体周囲の筋肉および靱帯組織を可及的に切除し, 頸椎は第1頸椎から第3頸椎($C_1\sim C_3$)と第1胸椎から第3胸椎($T_1\sim T_3$)をボーンセメントで固定した。腰椎については上方は第10胸椎から第12胸椎($T_{10}\sim T_{12}$),

下方は仙椎を同じくボーンセメントで固定した。

力学特性は上記試料の粘弾性特性を測定した。さらに, 同一試料の椎弓・椎間関節(後方要素)を切除後にも同様な測定をおこない, その後, 静的引張試験を実施した。

粘弾性特性は本研究室で開発した, 動的粘弾性測定装置(オリエンテック社製)を用いて測定した。脊柱の後方要素切除前では周波数35Hz, 静的引張荷重5.0N, 振幅2.0Nの動荷重を負荷した。後方要素切除後は, 周波数35Hz, 静的引張荷重2.0N, 振幅1.0Nの動荷重を重畳して, 荷重・変位応答を測定した。すなわち, 荷重

$$F=F_0+F_1\sin\omega t \quad (1)$$

に相当する変位

$$D=D_0+D_1\sin(\omega t-\delta) \quad (2)$$

より, 動的スチフネス(Dynamic stiffness) F_1/D_1 (N/mm) と位相差($\tan\delta$)を測定した。

粘弾性特性を測定した後, 引張試験を実施した。引張試験はインストロンタイプの万能試験機を用い, クロスヘッドスピード1.0 mm/minでおこなった。この試験から, 破断荷重(Fracture Load), 破断強度(Fracture Stress, 破断荷重を破断面積で割った値), 破断までの荷重・変位曲線の面積から変形エネルギー(Deformation Energy)を求めた。実験中は試料の乾

*1 産業技術総合研究所
〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2

*2 筑波大学・整形外科
〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1

*3 東京大学大学院工学系研究科
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

燥を防ぐため生理食塩水を点滴した。

骨密度はDEXA (Dual Energy X-ray Absorptiometry, DCS-600 アロカ社製) 法によって計測した。

3. 結果と考察

3.1 動的試験

Fig.1は頸椎のスチフネスの週齢による変化を示す。(以下, データは平均値と標準偏差を示す) スチフネスの値は24週齢

Fig.1 Variation of cervical stiffness with time (with soft tissue around).

までは増加し, その後, 減少し48週から84週齢までは大きな変化はなく98週齢で減少している。スチフネスと週齢の関係を回帰分析により求めると図中のような3次式で表される。

粘弾性効果の指標として動的荷重と変位の位相差 $\tan\delta$ の値と週齢の関係はFig.2のようになる。5週から24週までは $\tan\delta$ の値は減少し, 36週で最大になり, それ以後72週齢までは大差なく, 84週, 98週齢で減少している。

スチフネスと $\tan\delta$ の変化を成長期(ラットの場合, 9週齢または10週齢以降を成長ラット, 成熟ラットと呼び, それ以前を成長期と呼んでいる)に注目してみるとFig.3のようになる。スチフネスの値は5週から24週齢まで週齢の増加にしたがって大きくなっている。それとは逆に $\tan\delta$ の値は週齢の増

Fig.3 Variation of cervical stiffness and $\tan\delta$ with time from 5 week to 24 week.

Fig.2 Variation of cervical $\tan\delta$ with time (with soft tissue around).

Fig.4 Variation of cervical stiffness and $\tan\delta$ with time (without soft tissue around).

加に伴い減少している。成長期ラットの頸椎は週齢の増加にしたがいスチフネスの値も大きくなり、 $\tan\delta$ の値が減少している。この結果から、成長期ラットの頸椎は時間経過（週齢の増加）とともに、頸椎全体が弾性（脆性）的な材料に変化していることが分る。週齢とスチフネス、 $\tan\delta$ の関係を回帰分析によって回帰式を求めると、スチフネスは正の1次式、 $\tan\delta$ は負の2次式で各々図中のように表され有意差も確認した。

Fig.4は椎弓・椎間関節（後方要素）切除後のスチフネス、 $\tan\delta$ と週齢の関係を示す。スチフネスの値は切除前に比較して全体的に低くなっている。 $\tan\delta$ の値はスチフネスのような一定の傾向は見られない。切除前のスチフネスの最大値は29.2N/mmであり、切除後の最大値は12週齢の15.0N/mmで48.6%減少している。5週齢では切除前では11.7N/mmであり、切除後では6.8N/mmになり42.0%の減少になっている。このように、切除後では切除前の値の40～50%に減少している。し

Fig.5 Variation of lumbar stiffness with time (with soft tissue around).

Fig.6 Variation of lumbar $\tan\delta$ with time (with soft tissue around).

たがって、この減少分は後方要素とその周囲の軟部組織が担っていたことが明らかになった。

Fig.5に腰椎のスチフネスの週齢依存性を示す。5週から24週齢まではスチフネスは週齢の増加とともに大きくなっている。それ以降98週齢までは多少増減が見られるが大きな変化は表れない。頸椎と比較してみると、24週齢までは週齢の増加とともにスチフネスの値が大きくなり同様な傾向を示している。36週齢以降では腰椎のスチフネスの増減は頸椎に比較して安定している。この関係を回帰分析により回帰式を求めると図中のような3次式で表され有意差も存在した。

これに対応する振動荷重と変位の位相差 $\tan\delta$ の週齢依存性をFig.6に示す。 $\tan\delta$ の値は36週までは週齢の増加とともに大

Fig.7 Variation of stiffness and $\tan\delta$ with time (without soft tissue around).

Fig.8 Variation of fracture load with time (cervical and lumbar spine).

きくなっている。48週以降では $\tan\delta$ の値はほぼ一定の値を示している。頸椎と比較してみると、頸椎では成長期（5週～24週齢）ではスチフネスが増加し、 $\tan\delta$ の値は減少して弾性（脆性）的な材料に変化しているのに対し、腰椎ではスチフネス、 $\tan\delta$ とともに増加して载荷能力と粘弾性効果を兼備えた材料に変化して頸椎とは大きく異なった材料になっていることを明らかにした。 $\tan\delta$ と週齢の関係を回帰式で表すと図中のような1次式になり有意差も認められた。

この腰椎の後方要素を切除した後のスチフネスと $\tan\delta$ の週齢依存性をFig.7に示す。スチフネスの値は36週まで増加傾向にあり、36週から62週まではほぼ一定で72週では若干増加し、それ以降減少している。スチフネスの値は後方要素切除前では24週齢で19.4N/mm、それ以降62週齢までは18.0N/mmの間の値になっている。切除後では24週齢の値は7.0N/mmで切除前の64%減少になっている。この減少率は頸椎の切除前と切除後の減少率40～50%に比較して10%以上大きく、腰椎の後方要素は頸椎の後方要素より荷重支持の役割が大きいことを示唆している。

粘弾性効果の指標である $\tan\delta$ の値は全体的にスチフネスと同様に後方要素切除前の値より低下している。後方要素を切除したことにより、スチフネスおよび $\tan\delta$ の値が低下していることは载荷能力とともに粘弾性効果も減少し材料的には脆弱な材料に変化していることが判明した。スチフネスと $\tan\delta$ の週齢による回帰式を求めると、図中のようにスチフネスは負の2次関数、 $\tan\delta$ は正の2次関数で表され各々有意差も見出された。

3.2 静的試験

Fig.8は腰椎と頸椎の破断荷重の週齢依存性を示す。破断荷重は腰椎が頸椎より大きく、頸椎の破断荷重は24週齢以降では13.3～17.2N、腰椎では25.8～34.0Nになって頸椎の平均値と標準偏差は 14.8 ± 1.4 N、腰椎のそれは 30.3 ± 3.6 Nで腰椎の

破断荷重は平均値で2倍になっている。頸椎および腰椎の破断荷重の週齢依存性の回帰式を求めると、双方とも図中のように負の2次関数で表され有意差も確認された。

頸椎の破断強度の週齢依存性をFig.9に示す。破断強度は12週齢までは直線的に増加し、24週から48週齢までは減少傾向にあり、62週からは大差はない。週齢による回帰式を求めると図中のような負の2次式になり有意差も認められた。

Fig.10 (a)(b)に頸椎および腰椎の変形エネルギーの週齢依存性を示す。(a)は頸椎、(b)は腰椎の変形エネルギーを表している。頸椎のエネルギーは図から明らかなように正の2次関数で表されるのに対し、腰椎のエネルギーは直線で近似でき傾向が相違していることが判明した。

a) Cervical

b) Lumbar

Fig.9 Variation of cervical fracture stress with time.

Fig.10 Variation of deformation energy with time.

a) Femoral-diaphysis

b) Femoral-distal

c) Third Lumbar (L3)

Fig.11 Variation of bone density with time.

3.3 骨密度

骨密度は大腿骨々幹部 (Femoral-Diaphysis), 膝関節を構成している大腿骨遠位部 (Femoral-Distal) と第3腰椎 (L3) について測定した. Fig.11 の(a)は大腿骨々幹部、(b)は大腿骨遠位部、(c)は第3腰椎の骨密度の週齢依存性を示す。骨密度の変化はすべて5週齢から週齢の増加とともに値が大きくなり、部位によって24週齢と30週齢後半で最大値になり、それ以後、週齢の増加とともに減少する傾向にあり各々の回帰式を求めると図中のような式で表され有意差も見出された。

第3腰椎 (L3) の海綿骨の骨梁構造を明らかにするため骨梁の平均厚さと単位骨量を測定した。

Fig.12は骨梁の平均厚さの週齢依存性を示す。骨梁の平均厚さの最大値は12週と24週齢で80.0 μ m, 最低値は84週齢の

Fig.12 Variation of mean trabecular thickness with time.

Fig.13 Variation of trabecular bone specific volume with time.

55.0 μ mであり、最大値からの減少率は31.3%になっている。この関係を求めると図中のような式で表されるが有意差は見られなかった。

Fig.13は単位骨量(単位面積あたりの骨量の占める割合)の週齢依存性を示す。骨量の最大値は12週齢の37であり、最低値は12.5, 最大値からの減少率は66.2%になっている。この関係の回帰式は図中のようになり有意差も認められた。

この結果から、骨量の減少率は平均厚さの減少率の2倍以上になって、加齢による海綿骨の構造変化は骨梁の厚さより骨量の減少が顕著になっていることが明らかになった。

3.4 骨密度と力学特性

Fig.14は腰椎後方要素切除前のスチフネスと第3腰椎の骨密度の関係を示す。骨密度の増加とともにスチフネスの値も

Fig.14 Relation between stiffness and density of bone (L3).

Fig.15 Relation between lumbar fracture load and density of femoral-diaphysis.

大きくなり正の相関を有している。この関係の回帰式は図中のような1次式になり有意差も確認された。

Fig.15は腰椎の破断荷重と大腿骨々幹部の骨密度の関係を示す。さきのスチフネスと腰椎の骨密度と同様に骨密度の増加とともに破断荷重も大きくなって正の相関を有し有意差も認められた。

骨密度は骨中に含有されている無機成分の総量を表している。骨(海綿骨)の組成は無機質50%,蛋白質30%,水15%,多糖類5%から成り、無機質以外は骨の载荷能力に寄与しない。したがって、骨密度の高低によって骨の载荷能力が決定される。

骨密度と力学特性の関係については、VoseとKubalaが三点曲げ試験による破断応力とX線の吸収から求めた無機成分の含有量との関係を調べ、無機成分の増加によって破断応力が大きくなるという結果を得ている¹⁾。Cutreyは家兔の骨を用い三点曲げ試験による破断応力および弾性率と、プラチナのルツボに骨を入れ有機成分を燃焼させてしまう方法により骨密度を求め同様な結果を得ている²⁾。著者らも馬の第3中手骨の三点曲げ試験をおこない破断応力、弾性率は骨密度は正の相関を有し、有意差も依存することを明らかにした³⁾。

4. 結 論

幼若期(5週齢)から老年期(98週齢)のラットの頸椎および腰椎の力学特性と骨密度を調べた結果、以下の点を明らかにした。

頸椎および腰椎の粘弾性特性を調べ、硬さの目安となるスチフネスと粘弾性効果の指標であるtan δ の週齢依存性を測定し、回帰式によりその関係を明らかにした。頸椎と腰椎の週齢による力学特性変化は、頸椎は弾性的(脆性)な材料に変化しているのに対し、腰椎は载荷能力、粘弾性効果とも優れた材料に変化し両者は相違した材料に変化していることが判明した。頸椎、腰椎ともに後方要素切除後ではスチフネスの値が40~60%減少し、この減少分は後方要素が担っていたことを明らかにした。

静的試験による頸椎および腰椎の破断荷重、変形エネルギーの週齢依存性を調べ、回帰式により関係を求めた。頸椎の強度の週齢依存性を明らかにした。

骨密度は大腿骨々幹部、遠位部、第3腰椎を測定し、週齢依存性を明らかにした。第3腰椎は骨梁構造の変化を調べ、加齢による骨梁の厚さと骨量の関係が明らかになった。

骨密度と力学特性はスチフネス、破断荷重ともに正の相関を有していることが確認された。(2000年9月26日、第48回レオロジー討論会(高知市)にて発表)

参考文献

- 1) Vose GP, Kubala AL, *Hum Biol*, 31 (1985).
- 2) Curry JD, *J Biomechanics*, 2, 1 (1969).
- 3) 白崎芳夫, 立石哲也, 片桐 祐, 日本レオロジー学会誌, 17, 218 (1989).