



北海道公立大学法人  
**札幌医科大学**  
Sapporo Medical University

**札幌医科大学学術機関リポジトリ *ikor***

SAPPORO MEDICAL UNIVERSITY INFORMATION AND KNOWLEDGE REPOSITORY

Title	骨の科学入門
Author(s)	松嶋, 範男
Citation	札幌医科大学保健医療学部紀要,第3号: 1-9
Issue Date	2000 年
DOI	10.15114/bshs.3.1
Doc URL	<a href="http://ir.cc.sapmed.ac.jp/dspace/handle/123456789/6570">http://ir.cc.sapmed.ac.jp/dspace/handle/123456789/6570</a>
Type	Journal Article
Additional Information	
File Information	n1344919231.pdf

- コンテンツの著作権は、執筆者、出版社等が有します。
- 利用については、著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲内で行ってください。
- 著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲を越える利用を行う場合には、著作権者の許諾を得てください。

# 骨の科学入門

松嶋 範男

札幌医科大学保健医療学部一般教育科

## 要 旨

骨は歯の組織とともに硬く、ヒトの体を支えたり持ち上げたりする役目を持つ。本総説では、次の4点を中心に説明しながら、骨を物質科学および材料科学、生体力学の観点から解説する。①どうして骨は金属のように強靱なのか。②どうして大腿骨、脛骨などの長管骨は中が空洞の円柱構造をしているのか。③どうしてヒトは腰痛になりやすいのか。④骨は地球と対話している。さらに、このような骨の科学的理解から、ヒトの健康や病気についての一つの考えを提案する。

<索引用語>長管骨、コラーゲン、アパタイト、断面二次モーメント、ヤング率、腰痛、リモデリング

## 緒 言

骨は歯の組織とともに硬く、この硬さを利用して、2本足で立って歩く際に体を支えたり持ち上げたりする役目を持つ<sup>1)</sup>。背骨や腰の骨は体をもち上げるのに、両足の骨は杖のような役割をして歩くのに、それぞれ役立つ。2つ目は、体内の柔らかくて大切な臓器を保護する。3つ目は、骨はカルシウムの供給源としての役割である。カルシウムは、筋肉の収縮や、白血球の運動や食作用を活性化、神経細胞であるニューロンからの伝達物質の放出など、多くの生命現象の調節に関与している。骨は、このように生命活動に必須なカルシウムを生体内に供給しており、血液中のカルシウムは一定の濃度に保たれる。4つ目は、骨髄というところで血液をつくり、その場所を提供する。

本総説では、骨を分子レベルで理解する物質科学や、物体に働く力から骨の性質を解き明かす材料科学や生体力学の観点から解説し、如何に骨はすばらしい物質であるかを述べる。次の4点を中心にして解説する。1つ目は、どうして骨は金属のように強靱なのか。2つ目は、どうして大腿骨、脛骨などの長管骨は中が空洞の円柱構造をしているのか。3つ目は、どうしてヒトは腰痛になりやすいのか。4つ目は、骨は地球と対話しているという点である。実は、我々は地球から重力という力を受けている。この重力を骨は敏感に感知し、骨の役割を果たしている。また、骨の科学的な理解を通して導かれる病

気についての一つの考えを提案したい。

## 1. どうして骨は金属のように強靱なのか？

### 1-1. 骨の成分

大腿骨や脛骨、腓骨、上腕骨、尺骨、橈骨などの骨は、中が空洞の円柱状をした長い骨で、長管骨と呼ばれる<sup>1)</sup>。一方、その他にも骨盤の骨や頭の骨など、比較的平たい扁平骨とよばれる形の骨もある。長幹骨および扁平骨のいずれの骨も、その外壁は緻密骨であり、内腔は海綿骨によって構成されている。

このような骨は金属に比較できるほどの強靱さをもつ。何故であろうか？この疑問の意味を理解するために、骨の成分から説明したい。骨は、主としてミネラルのリン酸カルシウムの一つであるハイドキシアパタイトとコラーゲンと呼ばれる細長い糸のような繊維状の蛋白質からできている。体積で見ると、約50%をコラーゲンが、そして残り50%をリン酸カルシウムが占めている<sup>3)</sup>。

アキレス腱のほとんどが、コラーゲンからできているが、骨もまたグツグツ煮ると、コラーゲンの細長い糸のような繊維が小さく切れて煮汁にでてくる。これをそのまま冷やすと煮こごりとなる。以上のように、コラーゲンはタンパク質であるので、熱に弱い。事実、コラーゲン繊維を水のなかに浸して温度を室温から上げると60℃で収縮してしまう<sup>4)</sup>。一方、ハイドキシアパタイトは、簡単に水に溶けてしまわない安定性のある物質で、骨の中では非常に小さな細かい結晶を形成している<sup>5,6)</sup>。この

ため、骨からタンパク質のコラーゲンを取り除くと、小さな力を加えるだけで骨の形はくずれてしまい、食塩のように細かな“サラサラ”した状態になってしまう。

以上のことから、熱に弱いタンパク質のコラーゲンと“サラサラ”したアパタイトのミネラルからできている骨はどうして金属に較べられるほど強靱なのかが、大きな疑問となる。

1-2. 骨の伸張における応力とひずみ：ヤング率、破断<sup>7,9)</sup>

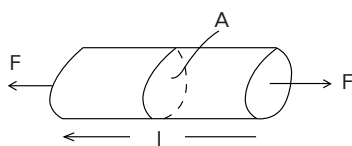


図1 一様な棒の伸長

物体の硬さは、物体が外からの力を受けたとき、どのくらいもとの形を変え変形するかを調べるとわかる。一番簡単で重要な例は、一様な断面積をもつ棒を引き伸ばしたり、圧縮したりする場合である。いま、長さ $l$ 、断面積 $A$ の棒がその両端で引っ張りの力 $F$ を受けているとする(図1)。そうすると、棒の長さは元の長さ $l$ から $\Delta l$ だけ伸びる。そこで、両端での引っ張りの力を変えて、伸びの変化量 $\Delta l$ を調べる。

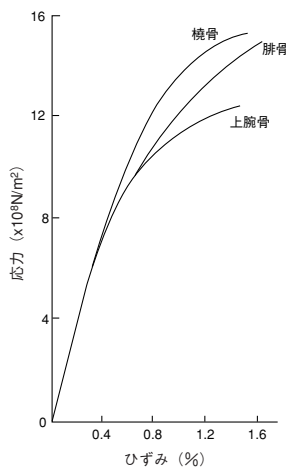


図2 湿った緻密骨の肢骨に対する応力-ひずみ曲線<sup>7)</sup>

図2は、湿った長管骨の上腕骨や腓骨などの肢骨についての場合である。横軸は、伸びの変化量 $\Delta l$ を元の長さ $l$ で割ったもの、すなわち“ひずみ”を示し、縦軸は、加えられた力 $F$ を棒の断面積 $A$ で割った“応力”を示す。加えられた力が小さい、0.5%以下のひずみに対しては、このように応力が大きくなるにつれひずみは直線的に大きくなる。この直線はほとんどの物質に見られ、この直線の傾きの大きさ(ヤング率)は、物質により異なるので、これが物質の変形のしづらさの目安となる。また、

応力が大きく、ひずみが約0.5%以上では、応力のわずかな増大でひずみが大きく増大してしまう。そして、ひずみが増えつづけると曲線は止まってしまう。これは、骨が壊れ破断することに対応する。すべての骨の破断は、ほぼ同じひずみの値、すなわち、約1.5%で起こっている。この点に対応する応力を、限界強度と呼ぶ。

表1 さまざまな物質のヤング率<sup>7)</sup>

物質	ヤング率 (N/m <sup>2</sup> )
鉄鋼	$2 \times 10^{11}$
肢骨(長軸に沿って)	$2 \times 10^{10}$
硬い木	$\sim 10^{10}$
腱	$2 \times 10^7$
肋軟骨	$1.2 \times 10^7$
ゴム	$10^6$
血管	$\sim 10^5$

以上のことから、ヤング率や限界強度は、骨の硬さ、強靱さを表す一つの量となる。アキレス腱のヤング率と比較すると、骨は約1000倍大きい(表1)。また、鉄鋼のヤング率よりも、一桁小さい。また、限界強度についていえば、鉄鋼鑄造物や、かなり強いアルミ合金の限界強度は、骨の値より2倍から3倍だけ強い力に過ぎない。これらのことから、骨は金属に較べて“まけない”くらい強靱といえるのではないだろうか。このような骨の強靱さは、どこから生まれるのであろうか。

1-3. コラーゲン分子とコラーゲン繊維の構造<sup>10,11)</sup>

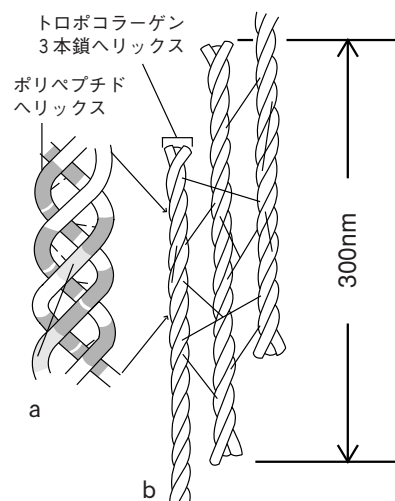


図3 コラーゲン分子<sup>10)</sup>

骨の中に存在するコラーゲン分子の構造を説明する。コラーゲン分子の大きさは、nmレベルの小さなサイズである。1mを地球の半径6400kmと見なすと、1nm(=10<sup>-10</sup>m)は6.4mmに相当する長さである。このコラー

ゲン分子は、約1000個のアミノ酸がつながったポリペプチド鎖で、3本がより合わさった螺旋構造をしている(図3)。分子全体の形としては、長さ300nm、太さが1.5nmの細長い棒状をとる。この細長い3本鎖のコラーゲン分子は、さらに重合して集合体(コラーゲン繊維)を形成する。

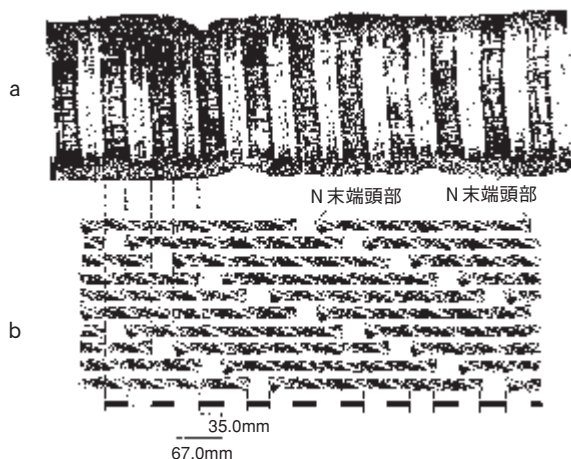


図4 コラーゲン繊維<sup>10,11)</sup>

a、コラーゲン繊維の電子顕微鏡写真、  
b、コラーゲン分子の配列。

コラーゲン繊維の電子顕微鏡写真を図4(a)に示す<sup>10,11)</sup>。観測される縞模様から、コラーゲン繊維は67nmの周期構造をもつことがわかる。コラーゲン繊維は、この67nmの周期構造とコラーゲン分子の長さ300nmの両者を満足する構造として、図4(b)のように並ぶ。コラーゲン分子は、繊維を構成するうえで、全部同じ方向を向き、繊維中の分子の頭と前の分子の尻尾の間には、35nmの空隙が存在する。この35nmの空隙に金属が染色されることにより、67nmの周期構造をもつ縞模様が観察された。また、コラーゲン繊維は5本のコラーゲン分子の集合体であることもわかる。

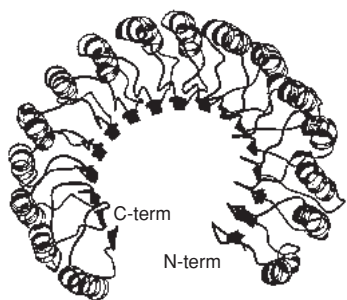


図5 リボヌクレアーゼインヒビターの立体構造の模式図<sup>12)</sup>

コラーゲン分子の3本の鎖は、生体内において適当な条件さえ整えば、お互いに寄り合って螺旋構造を形成するが、コラーゲン繊維はひとりでは形成されない。この繊維形成を手助けする一群のタンパク質(フィブロモジュリン、デコリンなど)が存在する。このタンパク質ファミリーのアミノ酸配列は、全く働きが異なるリボヌ

クレアーゼインヒビター(RI)のそれと似ている。このRIは、図5のように板状の $\beta$ -シートと螺旋状の $\alpha$ -ヘリックスが繰り返し単位となって、16回繰り返した馬蹄形の構造をとる<sup>12)</sup>。電子顕微鏡の観察により、フィブロモジュリンやデコリン分子の形も、やはり、馬蹄形をしていることが示された<sup>13)</sup>。最近、我々は配列解析からこれらの蛋白質では、12回の繰り返しアミノ酸配列をもつことを明らかにした<sup>14)</sup>。4回繰り返しが少ないので、図5のRIの馬蹄形よりも、両末端間の幅はより大きくなると推測される。

1-4. 骨のコラーゲン繊維とアパタイトの空間的配置

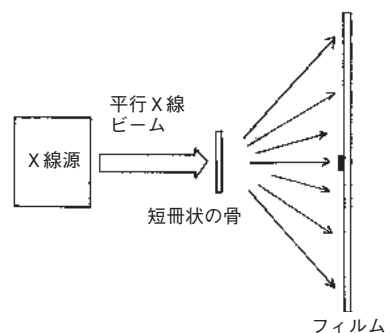


図6 X線小角散乱装置の概念図

X線は、物質を構成する電子により散乱する。この性質を利用して、分子等の小さなサイズの構造をしらべることができる。図6は、X線散乱装置の概略を示す。X線発生装置から発生した平行なX線を薄い短冊状の大腿骨に当てると、さまざまな方向にX線が散乱する。観測されたX線散乱パターンは、特徴的な扇形として現される(図7)<sup>15-17)</sup>。この扇形散乱は、ハイドロキシアパタイトが、骨の中でコラーゲン分子と同じく棒状をして存在していることを示す。また、この棒状のアパタイトは、長さが少なくとも20nmで太さは4nmであることも示す。このサイズは、コラーゲン繊維の構造で示した空隙の大きさに相当する。このことから、棒状のアパタイトがコラーゲン繊維の空隙に沈積することが強く示唆された。

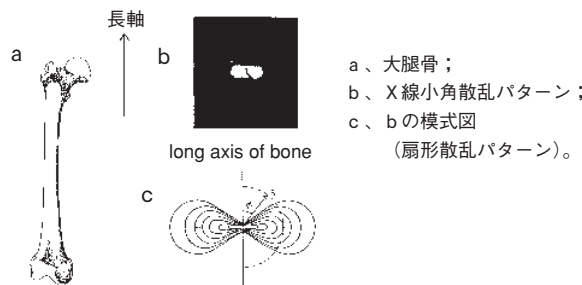


図7 大腿骨のX線小角散乱<sup>15-17)</sup>

アパタイトとコラーゲン繊維は、体積で1:1の割合で骨に含まれている。しかしながら、コラーゲン繊維の空隙に沈積しているアパタイトの量は、骨に含まれるミネ

ラル全体の40%ほどに過ぎない。そこで、残りのミネラルは、コラーゲン繊維の中ばかりではなく、コラーゲン繊維の間にも沈積すると考えられる<sup>3)</sup>。

1-5. 骨のヤング率の異方性<sup>9,18)</sup>

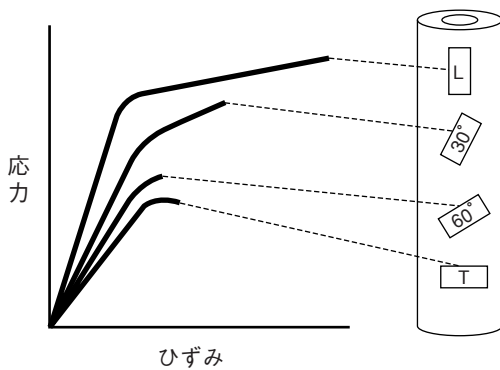


図8 ヒト大腿骨のヤング率、限界強度の異方性<sup>9)</sup>

L、長軸方向；30°、中心軸に対し30°傾斜；  
60°、中心軸に対し60°傾斜；T、横軸方向。

図8は、ヒト大腿骨の4つの方向からの応力-ひずみ曲線を示す。このように、応力-ひずみ曲線における直線部分の傾きは、大腿骨が伸びた方向（長軸方向）からの傾斜角度が大きくなるにつれ、小さくなっている。このことは、この傾斜角度が大きくなるにつれ、骨のヤング率が小さくなることを意味する。同様に、限界強度の値も小さくなっている。したがって、骨の強靭さは、大腿骨の長軸方向には強いが、長軸方向からの傾斜角が大きくなるにつれ弱くなることになる。この変化は、扇形散乱パターンから計算される棒状アパタイトの長軸方向の分布に対応している<sup>18)</sup>。

大腿骨の長軸方向は、体重がかかる方向なので、この方向にもっとも強く負荷がかかることになる。したがって、骨は最も負荷のかかる方向において強靭さを増すように形成されていることがわかる。

2. どうして大腿骨、頸骨等の長幹骨は中が空洞の円柱構造をしているのか？

大腿骨、脛骨等の長管骨は、中が空洞の円柱である。これに似た構造は、他の生物にもよくみられる。たとえば、竹や茎も中が空洞である<sup>19,20)</sup>。

2-1. 曲げ強さ<sup>7,19,21,22)</sup>

これまで、物体の形を変える例として、棒を引き伸ばしたり、圧縮したりする場合を考えてきた。いま、図9に示すように、板の両端を支え、板の真中に力を加えると、板は図のように曲がる。このような物体の曲がり強さは、材料の形に強く依存する。

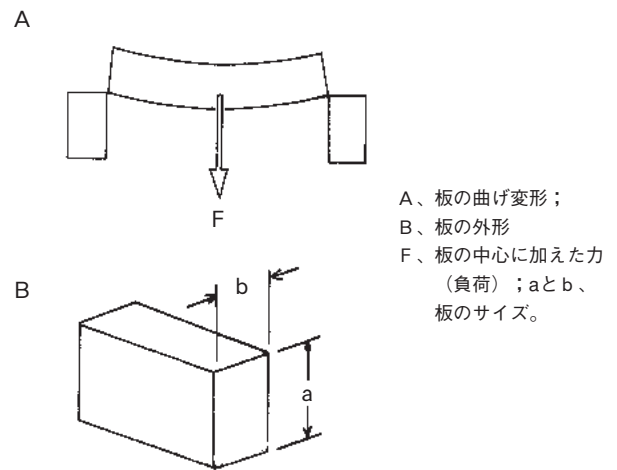


図9 板の曲げ変形

材料の曲がり強さは、断面二次モーメントで表される。板の断面が長方形の場合、この板の断面二次モーメント  $I_a$  は、次式で表される。

$$I_a = a^3 b / 12$$

ここで、 $a$ は板の厚さ、 $b$ は板の幅である。したがって、 $I_a$ は、単純に板の厚さに比例するのではなく、3乗の形で影響する。

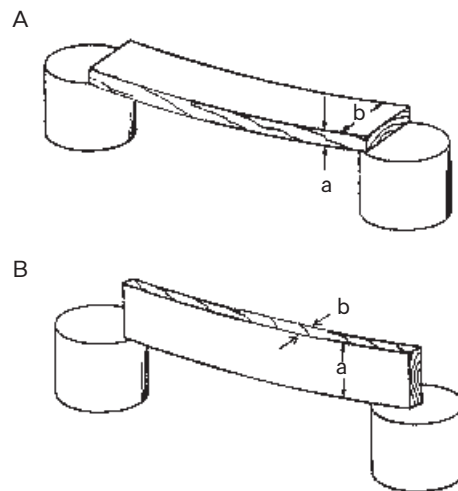


図10 板の曲げ強さの比較<sup>21)</sup>

一つの例を示す(図10)<sup>21)</sup>。Aの板では、板の厚さ  $a$  が4cmで、板の幅  $b$  が12cmである。一方、Bの板のように立てると、板の厚さ  $a$  が12cmで、板の幅  $b$  が4cmとなる。断面二次モーメントの値は、板1の  $I_a$  を1すると、板2の方が9倍も大きくなる。したがって、Bの板の方が9倍も、“曲がりにくい”、“たわみにくい”、ことになる。

2-2. 空飛ぶ爬虫類（翼竜）の指の管状構造<sup>23)</sup>

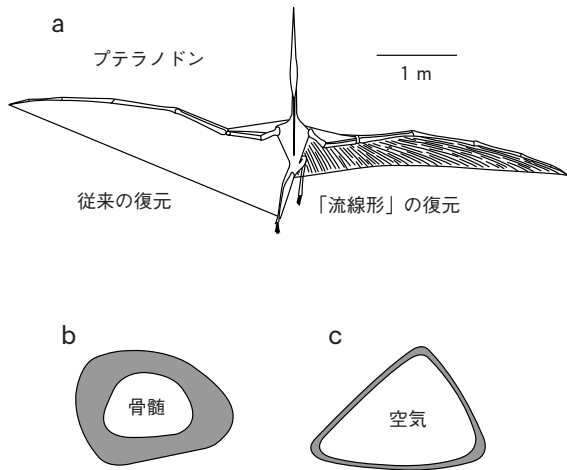


図11 空飛ぶ爬虫類（翼竜）、プテラノドン<sup>23)</sup>

- a、プテラノドンの化石の復元図；
- b、典型的な哺乳動物の骨（脛骨）の断面図；
- c、プテラノドンの長い指の第一指骨の断面図。

面白い一つの例を示したい。プテラノドンと呼ばれる翼竜は、驚くほど長い指をもっており、そのことが翼を支えるのに役立っている（図11a）。比較のために、ラクダの脛骨の断面（図11b）も示す。この翼竜の長い指の骨は、中空の管状をしていて、壁の厚さがわずか“1mm”ほどしかない（図11c）。この管構造は、強さと軽さを得るのに最適である。自転車のフレームや建築現場の足場が管でできていることもこの理由である。これに比べ、脛骨などの長管骨は管状をしているが、その大半は骨髄が詰まっており、とりわけ軽くはなりえない。鳥の骨の多くが壁の薄い中空の管とはいえ、プテラノドンの翼の骨ほどに壁の薄いものはない。

このように、材料科学の観点からみても、生物の骨の形、構造はみごとにまで、合理的にできている。

3. どうしてヒトは腰痛になりやすいのか？

腰痛は、非常によくある病気で、5人のうち4人、すなわち80%は一生の中に一度や二度は腰痛にかかると言われている。脊柱は上から7個の頸椎、12個の胸椎、そして5個の腰椎からなっている。これらの椎骨がレンガ状に積み重なっていて、椎骨の間にはやわらかい椎間円板があってクッションの役割を果たしている。その下には、仙骨と尾骨がある。全体的に脊柱はまっすぐではなく、前後に湾曲している。特に、腰の部分の腰椎と仙骨、尾骨はS状湾曲をしていて、直立2足歩行をするヒトの特徴となっている。

3-1. 曲げ伸ばしに際して第5腰椎に加わる力<sup>7,24)</sup>

それでは、どの位の力が脊柱に働くかを調べてみよう。一つの例として、第5腰椎に加わる力を計算する。まず、

身体の体幹部をもちあげるのに用いられる筋肉について考える。このような動作に使われる筋は脊柱起立筋と呼ばれる筋である。これらの筋は、もともと脊柱の運動や姿勢の保持をするためにある。仙骨と腸骨（寛骨を構成する骨の一つ）から始まり、すべての腰椎についているため腰を後ろに曲げる作用をするので、特に床から物を持ち上げる時に使われる。

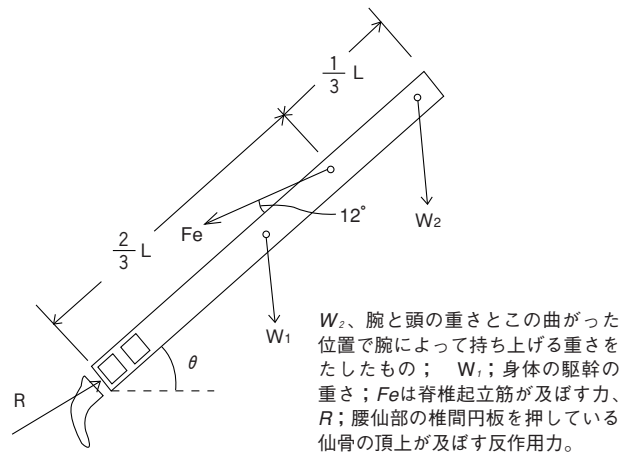


図12 剛体とみなした脊柱に働く4つの力<sup>7)</sup>

次に、脊柱を一つの硬い棒（剛体）と考えてみよう（図12）。この棒が身体の重みで回転し、身体が転倒しようとしたとき、脊柱起立筋が脊柱をひっぱる1本のひもとと同じ働きをするので、転倒をまぬがれることになる。引っ張る方向は、解剖学的所見から、背中を曲げる角度が何度であってもいつも脊柱に対し12°の方向であること、そして、脊柱起立筋が付着している点は脊柱の第5腰椎から2/3のところであることが知られている。

このとき、剛体とみなした脊柱には4種類の力が働く（図12）。 $W_2$ は、腕と頭の重さとこの曲がった位置で腕によって持ち上げる重さをたしたもの。 $W_1$ は身体の体幹の重さ； $F_e$ は脊柱起立筋が及ぼす力、 $R$ は腰仙部の椎間円板を押している仙骨の頂上及ぼす反作用力である。 $R$ は、具体的には腰仙部の椎間円板にかかる力といったほうがわかりやすい。この力の図から、剛体の釣りの問題として $F_e$ と $R$ を計算することができる。

一番重さのかからない場合を考えてみよう。すなわち、単に前にかがみ、その腕を真下にたれて、手になにも物を持たない場合である。 $\theta$ を30°とする。解剖学的な測定から、 $W_2$ は全体重の20%すなわち $0.2W$  ( $W$ は全体重)、 $W_1$ は全体重の40%、すなわち $0.4W$ となる。この場合、腰仙部の椎間円板にかかる力 $R$ は、 $R=2.7W$ すなわち全体重の2.7倍にもなる。これは驚くべき大きさと言える。 $\theta$ が30°の姿勢は、決して異常なものではなく、ゆりかごや乳母車から子供を抱き上げるときに起こる。荷物に近づくときは、図13bのように膝をまげ、できるだけ背をまっすぐにすることが大切である（図13）<sup>24)</sup>。

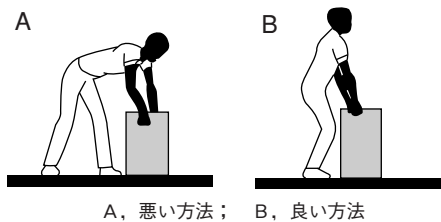


図13 重い物を持ち上げるときの方法<sup>24)</sup>

### 3-2. 椎間円板の変形<sup>2)</sup>

以上示したように、脊柱には想像される以上の大きな力が加わる。24個のレンガ状の椎骨は、主に普通80%の水と多糖類、タンパク質を含んだ粘弾性ゲルで満たされた椎間円板により分けられる(図14)。したがって、この円板は非常に変形しやすい。椎骨に大きな力が加わるということは、ゲル状の椎間円板にも大きな力が加わることを意味する。このため、椎間円板は障害を受け易く、ついには脊柱の内側を走る脊髄神経などを刺激するようになる。これが、腰痛を引き起こす原因となる。

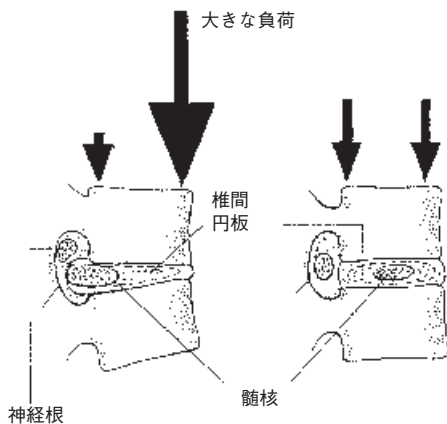


図14 大きな負荷による椎間円板の変形

## 4. 骨は地球と対話している

### 4-1. ジェミニ7号の実験<sup>2)</sup>

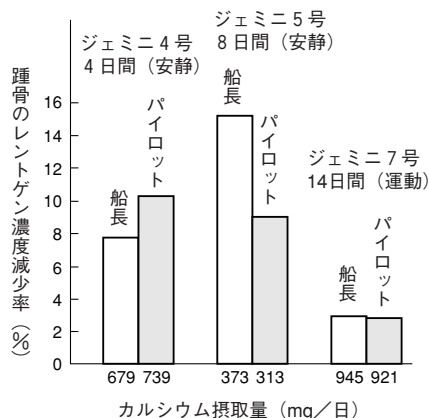


図15 宇宙飛行による証拠のレントゲン濃度の減少率<sup>2)</sup>

“骨は地球と対話している” ことの意味を理解するために、ジェミニ7号の実験を紹介する(図15)。1965年

6月に行われたジェミニ4号の宇宙飛行で、船長とパイロットの2人は、4日間という短い飛行であったにもかかわらず、かかとの骨である踵骨のレントゲン写真の濃さが、平均9%も減少していた。このことは、骨に含まれるミネラルの割合が9%減少したことを意味する。そこで、同年12月に14日の宇宙飛行をしたジェミニ7号では、宇宙船内で運動をするプログラムを立てて実行したところ、踵骨のレントゲン濃度減少率は、わずか平均2.9%にとどまった。重力のまったくかからない宇宙空間では、生体はカルシウムを沈積させて強くしておく必要がないものと判断したと考えられる。しかも、骨からのカルシウムの放出は、わずか4日間で平均9%もの減少といったぐあいに、その素早さと減少率の大きさは驚くべきものである。

これらの実験は、骨は地球から重力を受けており、それに敏感に反応していることを示している。

### 4-2. 骨折は修復する-ウオルフ (Wolf) の法則<sup>1)</sup>

骨折してもしばらくすると修復することは、よく知られている。このことに関連して、「ウオルフの法則」がある。ウオルフの法則は、「骨の形と構造は、使い方を一定にしておく、その使い方にしたがって、使いやすい形に変化する」というものである。骨は、荷重に対し何らかのセンサーをもつと同時に、逆に荷重や機械的、物理的な刺激が骨の成長に対する制御因子として働いていることは確かである。

### 4-3. 骨を強くする日常生活の3か条<sup>2)</sup>

これまでの解説から、改めて運動することの大切を認識されたのではないであろうか。林博士は「骨の健康学」<sup>2)</sup>で、骨を強くする日常生活の3か条として次の3点を指摘している。1つ目は、一日のカルシウム摂取量を0.2g増加させるということ。これは日本人の栄養として、カルシウムが意外と少ないことが指摘されているためである。2つ目は、夏なら木陰で30分間、冬なら手や顔に1時間の日光浴をするということ。これは日光浴によって、カルシウム吸収率をあげるビタミンDの生成が促進されるためである。3つ目は、1日30分間の散歩をすることである。

## 5. 一つのヒトの病気についての考え

これまで、遺伝と環境の関係については、ヒトの性格ばかりではなく、運動能力、身長差、知能などについてよく議論されてきている。本総説では、骨は荷重などの環境に適応して、強靭さ、骨量、形や構造を変えることを述べた。しかしながら、このような適応は、さまざまな遺伝子のはたらきにより制御されていることが明らかであり、環境により自由に骨を作りかえることはできない。やはり、遺伝子により骨の自由度には限界があり、

ここでも環境と遺伝の関係についての問題が現れる。

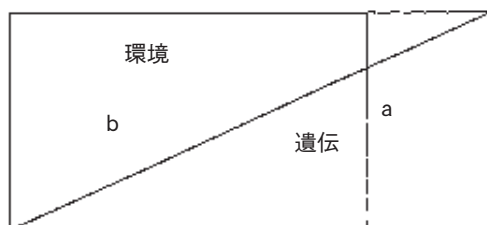


図16 病気における遺伝因子と環境因子の関係

ヒトの健康、病気を理解するために、図16を提案する。斜線が、遺伝因子と環境因子の寄与を分ける境界線と考える。この図で、一つの病気を縦線（aまたはb）で表す。例えば球脊髄性筋萎縮症（SBMA）をaで表されるとしよう。SBMAは、アンドロゲン受容体の異常により起こるので、aで示したように、遺伝因子の寄与が大きい25)。一方、骨粗鬆症をbで表す。骨粗鬆症は、遺伝因子を無視できないが、食事などの生活習慣がかなり影響するといわれているので、bに示すように環境因子の寄与が大きいと思われる。特に、体質にねざした多くの病気は、環境因子を良くすることにより、遺伝因子の寄与を減らすことができると考えられる。すなわち、ある病気の状態を表す縦線を、左側に移動することも可能ではないだろうか。

病気や健康における遺伝因子と環境因子の密接な関係は、何か当たり前のように思われるかも知れない。しかしながら、この観点は、ゲノムサイエンスを含めた生命科学の進展に伴い、確かな科学的真理として認識されつつある。今後、この密接な関係が、遺伝子レベル、分子レベル、組織レベルはもとより様々なレベルで解き明かされていくであろう。この関係の解明は、医学ばかりではなく保健医療分野にも本質的な変革をもたらすものと思われる。

## 6. まとめ

骨は、棒状なコラーゲン繊維とミネラルのアパタイトがnmレベルで特徴的な規則構造をとることにより金属に負けない強靭さをもつ。大腿骨、脛骨などの長管骨は、少ない材料で曲がりにくくするために中が空洞の円柱構造をしている。腰痛の一つの原因は、姿勢等により脊柱に体重の数倍もの力が加わるために、レンガ状の椎骨をつなぐ柔らかい椎間円板に障害を起し易いことである。骨は、荷重を敏感に感知し、強靭さ、骨量、形や構造を作りなおしている。骨のリモデリングと同様に、健康や病気の発症は、遺伝因子と環境因子が深く密接に関係している。

最近、リハビリテーション医学や保健医療の関心が高まるにつれ、ヒトの歩行などの運動解析、ヒトのそれぞれの骨格にどのような力が働くかを調べる事が盛んに

行われている。本総説の骨の科学的理解が役立てば幸いである。

## 謝 辞

本総説をまとめるにあたり乗安整而教授、吉尾雅春助教授からは解剖学について、山田恵子助教授からは生化学についていろいろ教えていただき、さらに有益なコメントもいただきました。感謝申し上げます。

## 補 記

本総説は、第4回札幌医科大学保健医療学部公開講座「健康づくりを考えるーからだのしくみ・生活リハビリー」（札幌、平成11年9月30日、10月1日）において、「骨を科学する」と題して発表した内容に基づいたものである。

## 文 献

- 1) 野田政樹：骨のバイオロジー。東京，羊土社，1998.
- 2) 林泰史：骨の健康学。東京，岩波書店，1999.
- 3) 松嶋範男，秋山盛雄，寺山良雄：X線回折法による骨のリン酸カルシウム微結晶の大きさ・配向および配列分布様式の研究。札幌医科大学自然人文科学紀要。22：1-10, 1981.
- 4) Sasaki N, Yamamura H, Matsushima N：Is there a relation between bone strength and percolation? J.Theor. Biol. 122：25-31, 1986.
- 5) Matsushima N, Tokita M, Hikichi K：X-ray determination of the crystallinity in bone mineral. Biochim. Biophys. Acta 883: 574-579, 1986.
- 6) Matsushima N, Hikichi K：Age changes in the crystallinity of bone mineral and in the disorder of its crystal. Biochim. Biophys. Acta 992：155-199, 1989.
- 7) Villars FMH, Benedek GB:Physics with illustrative examples from medicine and Biology; Volume 1 Mechanics. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1974 (医系の物理学，第1巻力学上。松原武夫訳，井上章監修，京都，吉岡書店，1980)。
- 8) Fung YC：Biomechanics; Mechanical properties of living tissues. New York, Springer-Verlag, 1981.
- 9) Nordin M, Frankel VH：Basic biomechanics of the musculoskeletal system. Philadelphia, LEA & Febiger, 1980 (整形外科バイオメカニクス入門。山本真，笹田直監訳，南江堂，1985)。
- 10) Rawn JD：Biochemistry. New York, Calolina Biological Supply Company, 1989. (ローン生化学。長野敬，吉田健右監訳，東京，医学書院，1991)。
- 11) 林俊彦：コラーゲン繊維形成。83-124, 1977. 形態形



- 成, 日本生物物理学会編
- 12) Kobe B, Deisenhofer J : A structural basis of the interaction between leucine-rich repeats. *Nature* 366 : 751-756, 1993.
  - 13) Scott JE : Proteodermatan matrix proteoglycan sulfate (decorin, lumican/fibromodulin) proteins are horseshoe shaped; Implications for their interactions with collagen. *Biochemistry* 35 : 8795-8799, 1996.
  - 14) Matsushima N, Ohyanagi T, Tanaka T, et al: Super-motifs and evolution of tandem leucine-rich repeats within small proteoglycans-biglycan, decorin, lumican, fibromodulin, PRELP, keratocan, osteoadherin, epiphygan, and osteoglycin. *Proteins; structure, function and genetics* 38 : 21-225, 2000.
  - 15) Matsushima N, Akiyama M, Terayama Y: Quantitative analysis of small-angle X-ray scattering of bone; Determination of sizes of its collagen and apatite components. *J. Appl. Phys.* 20 : 699-702, 1981.
  - 16) Matsushima N, Akiyama M, Terayama Y: Quantitative analysis of the orientation of mineral in bone from small-angle X-ray scattering patterns. *J. Appl. Phys.* 21 : 186-189, 1982.
  - 17) Matsushima N, Akiyama M, Terayama Y, et al: The morphology of bone mineral by small-angle X-ray scattering patterns. *Biochim. Biophys. Acta* 801: 298-305, 1984.
  - 18) Sasaki N, Matsushima N, Ikawa T, et al: Orientation of bone mineral and its role in the anisotropic mechanical properties of bone ; Transverse anisotropy. *J. Biomechanics* 22 : 157-164, 1989.
  - 19) Wainwright SA : Axis and circumference; The cylinder shape of plants and animals. Cambridge, Harvard Univ. Press, 1988 (生物の形とバイオメカニクス. 本川達雄訳, 東京, 東海大学出版会, 1989).
  - 20) 田中基八郎 : 植物のデザイン. 東京, 共立出版, 1983.
  - 21) Kane JW, Sternheim MM : Physics, Formerly life science physics. New York, John Wiley & Sons, 1978 (ライフサイエンス物理学. 石井千頼監訳, 東京, 広川書店, 1980).
  - 22) Alexander RM : Biomechanics. London, Chapman and Hall Ltd. 1975 (バイオメカニクス. 平川幸男訳, 講談社, 1976) .
  - 23) Alexander RM : Dynamics of dinosaurs & other extinct giants. New York, Columbia Univ. Press, 1989 (恐竜の力学. 坂本憲一訳, 東京, 地人書館, 1991) .
  - 24) 平田雅子 : ベッドサイドを科学する - 看護に生かす物理学. 東京, 学研, 1987.
  - 25) 高岡邦夫, 中村佑輔編 : 整形外科疾患からみた分子生物学. 東京, 南江堂, 1998.

## Fundamentals of bone science

Norio MATSUSHIMA

Department of Liberal Arts and Science, School of Health Sciences, Sapporo Medical University

### Abstract

Bone as well as tooth is a rigid tissue, which mainly consists of collagen and hydroxyapatite. In this article bone properties are discussed from a point of view of material science and biomechanics. The four following points are explained. (1) Why is bone comparable to steel in strength? (2) Why is long bone, such as the femur and neck bone, approximated by a hollow cylinder? (3) Why does mankind catch easily lumbagos? (4) There is an interaction between bone and earth. We propose an hypothesis about health and disease, which is derived through the bone science described here.

Key words : Long bone, Collagen fibrils, Hydroxyapatite, Young modulus, Lumbagos, Remodeling