

骨の力学適応と残留応力



研究ノート

田中正夫*

Mechanical adaptation and residual stress of bone

Key Words : Biomechanics, Bone, Mechanical adaptation, Residual stress

1. はじめに

機械工学・科学のコースに入学してくる学生諸君にとって、生き物を研究の対象とすることは、なじみにくいことのようにである。しかしながら、機械工学・科学の基本的な学理であるメカニクス(力学)の理論には、我々人間の体への興味から明らかにされたものは少なくない。筆者は現在、機械科学分野の生体機械講座に所属し、生体・機械システムに関するいくつかのテーマに興味を持っているが、ここでは、骨の力学適応と残留応力についての試み¹⁾⁻³⁾を紹介することで、つとめを果たしたい。

2. 生体組織の自然状態

力学において自然状態はもっとも基本的な状態である。生体を構成する器官や組織に力学的に接近するバイオメカニクスにおいても、このことには変わりはない。しかしながら、我々の体は常に何らかの力学的負荷の下にある。たとえば骨は、体幹を支持しており、個々の骨を体外に取り出さない限り、筋、靭帯、腱など周囲組

織から力を受けている。また、心臓や血管といった循環器系の器官は、常に血圧が作用した状態にある。このため、生きている限り、生体の器官や組織が自然状態におかれることは非常にまれなことと考えられ、実際のところ自然状態がどのようなになっているのかは、自明なことではない。また、器官として負荷が作用していない無負荷状態と、組織としての無負荷状態との関係についても同様である。

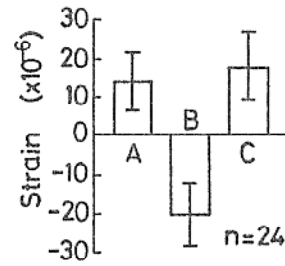
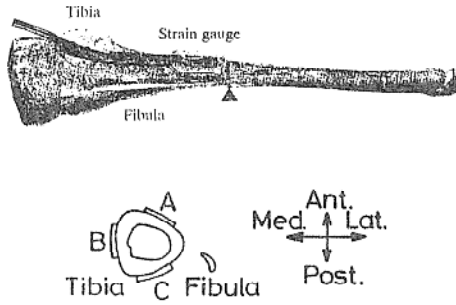
3. 骨の残留応力

血管や心臓といった循環器系の器官では、器官としての無負荷状態においても内部に応力場が残留することが、1980年代後半に実験的に確認され、器官としての無負荷状態と組織としての無負荷状態とが異なること明らかになった。この事実は、健全な負荷状態での生体構造の力学的機能との観点から注目されており、軟組織の力学機能と機能的適応とを考えるに際して、無視できない重要な因子となっている。硬組織においても無負荷状態の器官に残留する応力場の存在が予見されることから、筆者らは無負荷状態における骨からの残留応力の解放実験を試みてきた。

例えば、家兎の脛腓骨(図1(a))の分岐部で腓骨を離断することで不静定性を解除し、脛骨の変形をゲージを用いて観察すると、体重による脛骨のひずみとほぼ同程度のひずみが脛骨で観察される(図1(b))。また、空隙の多い海綿様の海綿骨を緻密な皮質骨が取り囲んでいる牛尾の椎骨から、上下の終板と内部の海綿骨を取り去ると、残された筒状の皮質骨には、体幹軸

*Masao TANAKA
1956年3月23日生
昭和58年神戸大学大学院自然科学
研究科システム科学専攻博士課程
修了
現在、大阪大学大学院基礎工学研
究科システム人間系専攻機械科学
分野、教授、学術博士、生体機械
システム、設計システム
TEL 06-850-6180
FAX 06-850-6182
E-Mail tanaka@mc.es.osaka-
u.ac.jp





(a) ゲージ貼付位置(A, B, C)と腓骨切断位置(▲) (b) 腓骨切断により脛骨に生じるひずみ

図1 家兎の脛腓骨の残留応力解放実験

方向、周方向ともに正のひずみが観察される。これらは、骨としては無負荷状態にある脛腓骨や椎骨の内部に応力場が残留していたことを示している。

4. 骨の構造最適性と力学適応

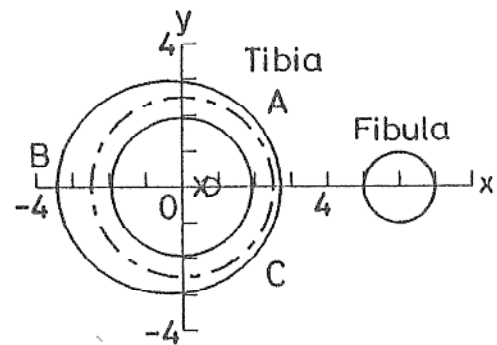
骨の構造は力学的機能に旨く対応しており、それは力学的適応による、とするウォルフの主張(ウォルフの法則と呼ばれる仮説)が提出されたのは、19世紀半ば過ぎである。これに刺激され、骨の構造最適性や力学的適応を理論的に説明する試みが行われてきたが、現象が定量的に観察されるようになったのは、20世紀半ばである。その後、連続体力学の枠組みからの理論モデルが数多く提出され、力学適応現象が定量的に考察されるようになった。しかしながら、これら理論モデルは、骨が無負荷状態にあるとき自然状態にあることを、暗黙に仮定している。

血管においては、機能的適応の結果である健全な器官に無負荷状態で残留する応力場を、健全な負荷状態における応力やひずみ場の力学的最適性から理解する試みが報告されている。前項で紹介したように、骨においても残留応力が存在することから、これを考慮した力学的な機能適応への取り組みが必要となる。ウォルフの仮説をはじめ、機能的に適応した状態を力学的な最適性と対応させて理解しようとする立場では、残留応力を考慮することの重要性は明らかである。骨は体幹の支持を主要な機能の一つとすることから、筆者らは強さと密接に関連する応力場に注目し、健全な負荷状態におけるその一様性に着目した再構築による力学適応モデル

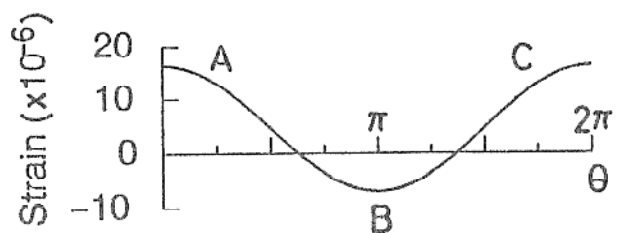
を検討している。

5. 残留応力を考慮する力学適応理論

再構築は骨質の吸収と形成の過程を経るが、これらは無負荷状態で進行するわけではない。従って、新たに形成される新生質は、周囲にもとから存在する旧生質の自然状態を知ることはできず、新生質の自然状態は旧生質のそれとは異なると考えるのが自然である。結果として、健全状態での負荷が取り除かれ、骨が無負荷状態になっても、局所局所の自然状態の非一様性に起因する応力場が残留することになる。



(a) 脛腓骨切断面形状



(b) 腓骨切断により脛骨に生じるひずみ

図2 家兎の脛腓骨の力学適応シミュレーション

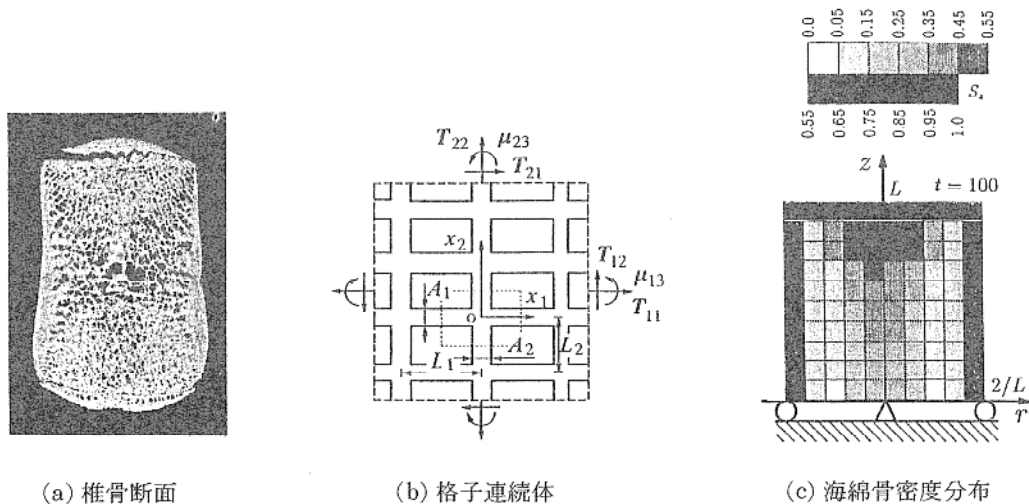


図3 牛尾椎骨の力学適応シミュレーション

先に紹介した家兎の脛腓骨のモデルとして、上下が剛体板で連結された円筒(脛骨)と円柱(腓骨)を考える。脛骨の厚さが一様な状態から圧縮負荷のもとでの力学適応のシミュレーションを行うと、図2(a)のように腓骨側で脛骨が薄く、反対側で厚くなり、応力の分布が一様となる。この状態で腓骨に相当する円柱を切断すると、図2(b)の様なひずみが脛骨に生じることになる。これは、実際に腓骨切断により観察された図1(b)と良い対応を示す。

また椎骨断面(図3(a))を、直交格子構造を有する連続体(図3(b))とモデル化した海綿骨と、その周囲を取り囲む皮質骨とで表し、圧縮と繰り返し曲げ負荷のもとで海綿骨格子の力学適応シミュレーションを行うと、図3(c)のような海綿骨の密度分布が得られる。このとき負荷の周期で平均した応力はほぼ一様となっており、ここから終板と海綿骨を離断し、周囲の皮質骨のみにすると、皮質骨には観察結果と同程度の正のひずみが生じることになる。

6. おわりに

ここでは無負荷状態で骨に残留する応力に関する若干の試みについて紹介した。骨の力学適

応機能と構造最適性はバイオメカニクスの古くて新しいテーマである。骨は生きており、メカニカルな因子だけで理解できるものではない。しかしながら力学適応機能と構造最適性は、解析・設計といった機械科学・工学の中心的課題と密接に関連しており、この意味でも興味深いテーマとして、我々の分野の中にある。機械工学・科学の分野に従事する者が、人間や生物と関わりを持つ機会は、間違いなく増えている。

最後に、本稿の執筆をお勧めいただいた、大阪大学大学院基礎工学研究科駒沢勲教授、吉川孝雄教授に感謝する。

参考文献

- 1) M. Tanaka, T. Adachi & Y. Tomita, JSME Int. J. Ser. A, 37-1, 1994, 87-95.
- 2) M. Tanaka, T. Adachi & Y. Tomita, JSME Int. J. Ser. A, 39-3, 1996, 297-305.
- 3) T. Adachi, M. Tanaka & Y. Tomita, Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 120-3, 1998, in press.

