

生体の機能的適応のバイオメカニクス



林 紘三郎*

Biomechanics of functional adaptation of living tissues

Key words : Biomechanics, Functional adaptation, Remodeling, Optimal design, Living tissue

1. はじめに

生体の機能と構造・構成を、力学的に解析したり、その結果を応用する分野はバイオメカニクス (Biomechanics) と呼ばれている¹⁾。生体はからだ全体であれ、それを構成する要素であれ、内的にも、外的にも力学的環境下にあるとともに、その機能は力学的法則の支配を受けており、力学的バランスの崩壊によって各種疾患や機能不全が生ずることが次第に明らかになってきている。さらにはそれらの治療や回復にも力学的配慮が不可欠と認識されている。生体には力学的環境に適応し、リモデリングする能力があるが、そのメカニズムはまだ解明されておらず、細胞レベルからからだ全体にいたる広範囲の研究が必要とされている。

バイオメカニクスが著しい発展の兆しを見せ始めたのは1970年前後であり、それ以来急速に、一つの学問、研究としての体系作りが進められてきた。わが国では特に、1992年度から3年間の計画で「生体機能と構造の維持・回復・強化のバイオメカニクス」の研究が、文部省の科学研究費補助金の重点領域として取り上げられ、極めて活発な研究活動が展開されている²⁾。

* Kozaburo HAYASHI
1942年7月13日生
昭和45年京都大学大学院工学研究
科博士課程修了
現在、大阪大学基礎工学部、機械
工学科、教授、工学博士、バイオ
メカニクス、バイオマテリアル、
生体工学
TEL 06-850-6170



ここでは焦点を生体組織の機能的適応に絞り、我々の研究グループで得られた結果の一部を紹介するとともに、その意義について述べる。

2. 負荷の変化に対する腱・靱帯の反応

図1は家兎の膝蓋腱(膝のいわゆるお皿から下方に伸びている靱帯)に作用する負荷を、我々が開発した特殊な方法で完全に除荷(□)すると、その強度はたったの2週間後には除荷前の30%以下に減少する³⁾。あたかも、負荷が作用しないなら、その強度を維持しておく必要がないことを知っているかのようである。通常作用する負荷の30%に軽減(○)するだけでは、強度の変化はほとんど現れない。完全に無負荷にするとダメであるが、少しだけ力を掛けてやれば機能は維持される。また、除負荷、或いは負荷軽減後、再び通常の負荷を作用させると強度

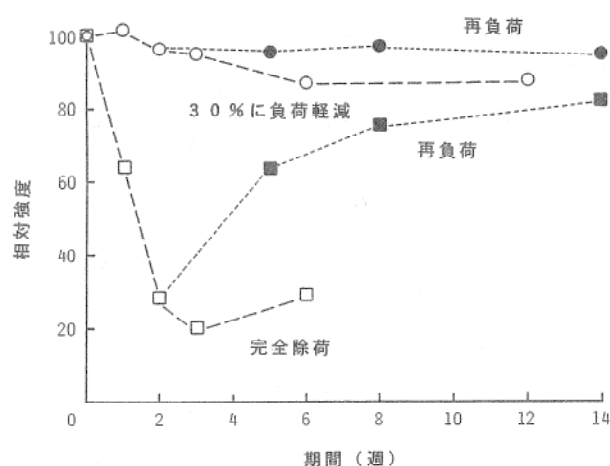


図1 除荷、通常の30%に負荷軽減、及び再負荷が家兎膝蓋腱の強度に及ぼす効果³⁾

は回復するが、その強度は極めて遅い(■, ●). センサーの感受性や生体の冗長性などが絡んでいるようであるが、そのメカニズムはまだわかっていない。

ところで、この実験をさらに発展させ、この腱を生体内で液体窒素を用いて短時間で凍結させ、細胞を死滅させたのち、完全に除荷させたところ、線維芽細胞が完全に消失している術後の2週の間でも、強度は大きく減少する現象を見出した。すなわち、このような腱・靱帯は細胞が存在しない状態でもリモデリングするという従来の常識を覆す現象を観察した⁴⁾。

3. 高血圧に対する動脈の適応

高血圧になると、血管内圧としての負荷が増大するのであるから血管壁に作用する応力(単位面積あたりの荷重)は増えそうである。しかしながら、これを実験的高血圧ラットで調べてみると、図2に示すように、高血圧になっても血管壁の応力は正常と変わらない値に維持される⁵⁾。血管内径は変化せず、外径が増加して壁が厚くなり、負荷を再配分するメカニズムが働くのである。生体組織が応力或いはひずみを受し、これを最適に制御する機構が存在することを示している。

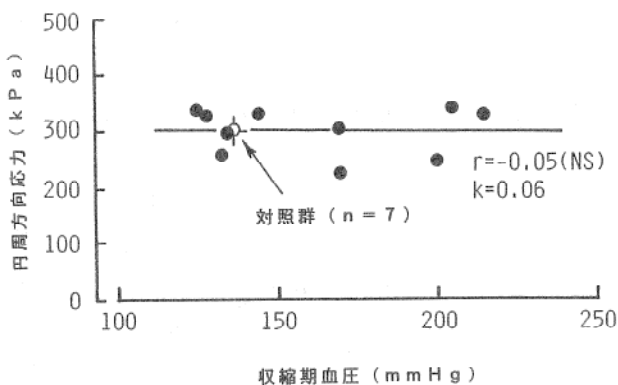


図2 高血圧ラットにおける血圧と動脈壁円周方向応力の関係⁵⁾。

4. 血管の残留応力

血管をイカリリングのように切り出し、次にその一箇所を切断すると、図3に示すようにバネのように開く。イカリリング状の血管には重力を

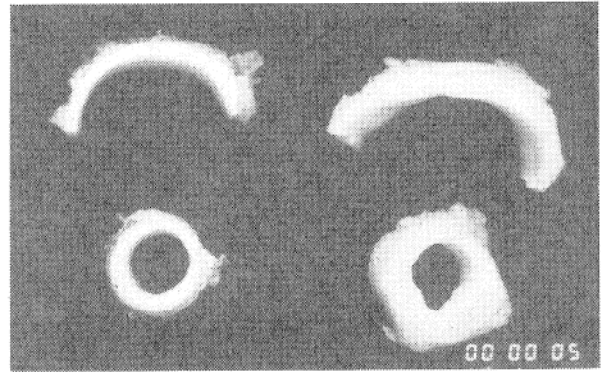


図3 リング状に切り出した血管の一部を切断すると開く現象

除いて外力は作用していないので、これが開くのは内部に応力が存在していたことを示す。すなわち残留応力があつたのである⁶⁾。残留応力は機械部品では極めて大事なものであり、これをわざわざ作って強度をあげる。

血管壁に残留応力が存在する理由について我々は次のような仮説を提案している。血管は形成されたのち常に血圧を受け、無負荷の状態を経験しない。当然いつもさらされている環境で最適な状態になっているものとか考えられる。すなわち、通常の高血圧の時に血管壁の断面上の応力分布は一様になっていることが推定される。断面上で応力の傾斜や応力集中の無い方が安全で、経済的、合理的であるからである。そうすると、血圧などの外力を除くと残留応力が現れてくる。すなわち、血管が力学的にうまく適応した結果、残留応力が生ずるのである⁷⁾。これも、生体の機能的適応、或いはリモデリングの現れということが出来る。

5. 生体の機能的適応現象研究の意義

細胞、筋線維、腱・靱帯、血管、心臓、骨などほとんどあらゆる生体素材、組織はさまざまな機械的刺激に対して反応し、機能的に適応し、リモデリングすることが次第に明らかになってきた。

機能が低下したり、不全となった生体組織、器官を回復させたり、強化する方策の有力なものの一つは、生体組織の機能的適応現象を利用する方法である。また、代用組織や人工材料、人工臓器を利用する方法があるが、これらの多

くは生体組織・器官と組み合わせたり、接合したりして利用され、当然負荷の再配分が生じ、生体側はこれに反応して形態や物性を変化させる。このような点で、生体の機能的適応、リモデリングの現象は基礎生物学のみならず、臨床医学においても極めて重要である。

また、生体は極めて長い歴史を経て淘汰され、作り上げられてきた一つの完成された機械である。このように理想的と言えるほどに設計されている生体の構造と機能、さらにはその適応制御現象の正確な解析と理解は、新しい工学・工業技術の開発に大きく貢献するものと期待される。すでに新しい設計手法の提案など、工学分野への効果も現れ始めており、生体から得られる知識が、新しい技術の開発に手掛りを与えたり、新たな興味ある研究対象を提供するものと期待されている。これまでの古典的工学設計の根底を変える画期的なものが生まれる可能性を秘めている。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編, バイオメカニクス概説, オーム社, 東京, 1993.
- 2) 林 紘三郎, 重点領域研究「生体機能と構造の維持・回復・強化のバイオメカニクス」
- 3) K. Hayashi, Biomechanical studies of the remodeling of knee joint tendons and ligaments, J. Biomech., in press.
- 4) K. Ohno, K. Yasuda, N. Yamamoto, K. Kaneda, K. Hayashi, Effects of complete stress-shielding on the mechanical properties and histology of in situ frozen patellar tendon, J. Orthop. Res., 11, 592-602, 1993.
- 5) T. Matsumoto, K. Hayashi, Mechanical and dimensional adaptation of rat aorta to hypertension, Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 116, 278-283, 1994.
- 6) K. Hayashi Experimental approaches on measuring the mechanical properties and constitutive laws of arterial walls, Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 115, 481-488, 1993.
- 7) K. Takamizawa, K. Hayashi, Strain energy density function and uniform strain hypothesis for arterial mechanics, J. Biomech., 20, 7-17, 1987.

