

# 生体力学シミュレーションに必要な生体組織物性の評価

機械工学科教授 大木 順司（機械63年卒）



最近のコンピューターの高性能化、3Dモデリングソフトウェアおよび有限要素法等の力学解析用ソフトウェアの高品質化を背景に、生体力学シミュレーションが盛んに行われるようになってきました。

私の所属する生体力学研究室では、陳献教授、蔣飛助教とともに、脊椎・脊髄、頭部、胸郭、膝など身体の多くの部位について力学シミュレーションを実施し、手術支援や病因の解明などに役立っています（図1は一例）。

このような力学シミュレーションをより正確に行うためには、モデル化した各部位の要素に正確な物性値（ヤング率、ポアソン比など）をそれぞれ適用する必要があります。これまで多くの研究者が主に動物を用いて生体組織の物性評価を行っており、骨・血管・腱などの物性を明らかにしていますが、モデルがより精密になると、生体の細部にわたる部位に対してそれぞれ物性情報が必要となります。しかし、既存のデータがない場合は、自ら物性試験を実施しなければなりません。

私が当研究室（当時は医用機械研究室）に

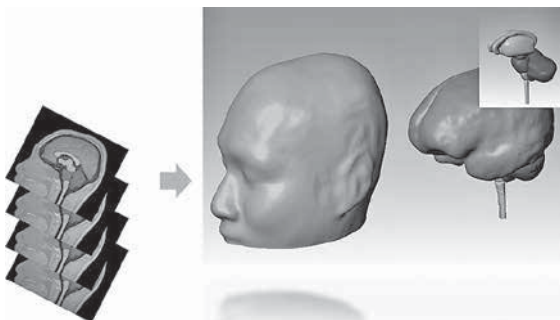


図1 頭部傷害シミュレーションに用いた頭部モデル（MRI画像より作成）

入ったのは平成19年度ですが、その当時の研究スタッフが、既に脊髄組織を構成する白質と灰白質の引張試験に、世界に先駆けて成功していました。その後、試験片の採取方法を見直し（図2および3）試験片形状・寸法の精度を高めるとともに、上記組織に対して横断方向の圧縮試験を行い、脊髄組織の力学特性における異方性を明らかにしました。加えて脊髄を覆う硬膜、クモ膜、軟膜などの組織に対しても引張試験を実施し、それらの物性、またその物性のひずみ速度依存性などを明らかにしました。

上記脊髄や他の組織の物性試験には、食用用のウシやブタを使用することがほとんどですが、脊髄後方に位置する黄色靭帯については手術で採取したヒトのものを使用しています。黄色靭帯は脊髄後方の椎間に存在する靭帯ですが（図4）、脊柱管狭窄症患者に施す

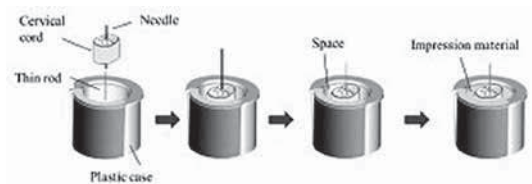


図2 脊髄固定方法の改良（3Dプリンターでケースを作製）

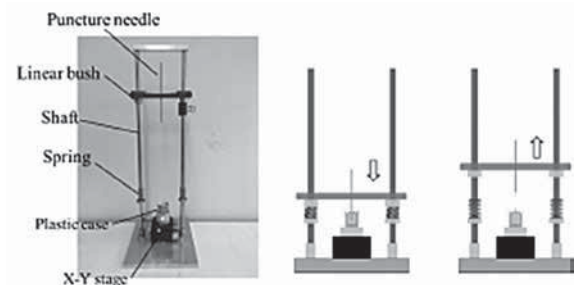


図3 開発した試験片採取用穿刺針落下装置（これまでバイオプシーガンを使用していたが、試験片採取位置にズレが生じるため新たに開発した）

椎弓除圧術で切除した椎弓に付着していて、通常は術後、椎弓ごとそのまま廃棄されます。これを共同研究者の医学部整形外科の医師から術後受け取り（大きき約10mm四方）、試験片に成形後、引張試験を実施しています（勿論、この試験実施にあたっては、倫理委員会の許可および患者の同意を得ています）。黄色靭帯の引張試験で得られた年齢の増加に伴う剛性（硬さ）の変化を図5に示します。図のように、黄色靭帯の剛性は加齢に伴い増加し、徐々に組織が硬化する傾向を示しました。この結果から、黄色靭帯を考慮した解析をより正確に行うには、年齢による物性の変化も考慮する必要があることが明らかとなりました。このデータは今後、むち打ち時の黄色靭帯たくれ込み（黄色靭帯が脊髄側に飛び出し脊髄を圧迫する現象）に関する解析に導入予定です。

その他、共同獣医の研究者と共同で多種動物の腱の物性評価も行っています。これは、

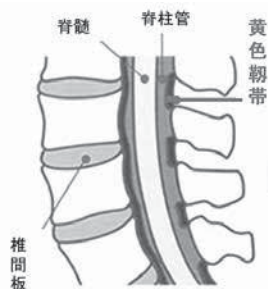


図4 黄色靭帯

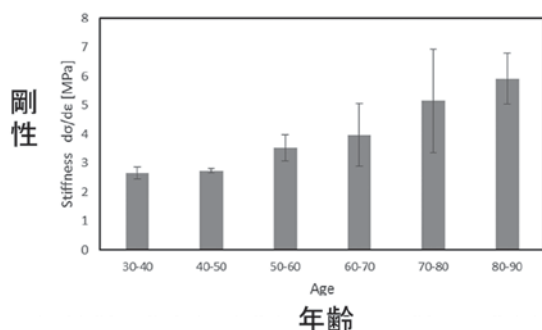


図5 黄色靭帯の年齢の増加に伴う剛性（硬さ）変化

動物のロコモーション（移動運動）と腱の物性との関係を調査するもので、現在40種以上の動物について前肢と後肢それぞれ8種の腱の引張・除荷試験を実施しています。試験結果の詳細については現時点では公表できませんが、動物の移動速度と腱の剛性との間に何かしら相関があり、興味深い結果が得られています。

生体組織、特に軟組織は通常水分を多く含んでいるため、引張試験時においては試験片の把持に苦労します。また、上述した黄色靭帯のように、採取した組織が小さい場合は試験片の成形にも苦労します。同じ組織でも個体差や採取した部位によって特性も異なりますし、元々特性の局所的なばらつきも多いため、試験結果の傾向を把握するのにも困難を極めます。このように生体軟組織の物性試験には、それ特有の多くの困難が伴います。

図6はシミュレーションとは直接関係ありませんが、脊髄神経根付近の硬膜のひずみ計測を、画像相関法を用いて行った結果です。画像相関法を用いるには、試験片表面にランダムパターンを施す必要があります。金属などの工業材料であれば、スプレーなどで容易に作成できますが、生体組織にはその手法は適用できません。この問題に対して、ある学生（既に修了していますが）が砂時計の砂を利用するアイデアを出してくれ、このひずみ計測に見事成功しました。

今後も研究スタッフ、学生達とアイデアを出し合いながら、困難を克服できるよう日々取り組みたいと思います。



図6 ブタ脊髄神経根付近のひずみ計測結果（破断が開始した矢印付近のひずみが徐々に増加している）