

振り子法による家兎膝関節の摩擦・粘弾性測定

Frictional and Viscoelastic Properties of Rabbit Knee Joint by Pendulum Test

○ 東藤正浩 (北大) 但野 茂 (北大) 岩崎倫政 (北大医)

Masahiro TODOH, Shigeru TADANO, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Norimasa IWASAKI, Graduate School of Medicine, Hokkaido University

Abstract: In this study, the method for measurements of the friction and viscoelastic properties was proposed by using pendulum tester combined with axial force sensor measuring joint forces. Healthy and OA rabbit knee joints were used in this experiment. The rotation center position and normal force of knee joint surface were calculated, and calculated friction, viscosity, and elastic coefficient. Each parameter was measured under different knee joint angles (90, 100, 110, 120 and 130) in this experiment. As a result, friction coefficients were larger at more flexed angle of knee joint. Viscosity and elastic coefficient indicated a constant value. The normal force of knee joint indicated a smaller value when the knee angle is small. Frictional, viscosity, and elastic force indicated a constant value even if knee angle changed. Coefficients of friction and viscosity of OA knee joint were larger than those of healthy one.

Key Words: Biomechanics, Joint, Friction, Viscosity, Elasticity

関節は優れた力学的機能をもつ一方、高い力学的負荷の作用する部位の一つである。そのため変形性関節症などの患者数も多く、その力学的機能を定量的に評価する診断手法の確立が重要である。これまで、関節摩擦評価手法の一つとして、振り子法による手法が報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。我々は、関節機能診断法の開発を目標に、振り子式関節摩擦測定機を作製し、変形性関節症による関節摩擦特性への影響や、薬剤投与による効果の定量的評価を行ってきた⁽⁴⁾。近年、関節運動における力学特性として、摩擦特性のみならず粘性の効果などが存在することが報告されている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。本研究では、より詳細な力学的特性を評価するため、膝関節-振り子フレーム系を、摩擦と粘性減衰、また弾性力が働く振り子としてモデル化した。その運動方程式から振り子の振幅減衰曲線を導出した。作製した振り子式試験機によって測定したデータによるパラメータ同定を行い、家兎膝関節の力学特性評価を行った。また健常膝と OA モデルの比較を行った。

2-1 膝関節振り子運動モデル

本研究の振り子試験機では、脛骨側を固定し、大腿骨側を振り運動させる。振り運動時には、膝関節に加わる荷重の他に、摩擦力と粘弾性力が膝関節接触面に作用し、振り運動のエネルギー損失は摩擦特性と粘弾性特性による。このとき、摩擦力は関節面の摺動が影響し、粘弾性力は関節軟骨の変形、および滑液の抵抗が影響している。そこで本研究では、振り運動が屈曲・伸展方向のみに行うものと仮定し、Fig. 1 に示すように膝関節-振り子フレーム系を、支点位置が変動し、摩擦と粘性減衰、また弾性力が働く振り子としてモデル化した。

この力学モデルの運動方程式は次式となる。

$$I\ddot{\theta} + cr^2\dot{\theta} + (mgl + kr^2)\theta + \mu N_r \text{sign}(\dot{\theta}) = 0 \quad (1)$$

ここで I は振り子慣性モーメント、 m は振り子質量、 g は重力加速度、 l は振り子長さ、 μ は摩擦係数、 c は粘性係数、 k は弾性係数、 r は回転半径、 θ は振り子角度、 N_r は関節荷重である。式(2)に示すこの運動方程式の一般解から、振り子の振幅減衰曲線は式(3)として求められる。

$$\theta = [\alpha \exp(-\beta t) + \gamma] \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

$$\theta_t = \alpha \exp(-\beta t) + \gamma \quad (3)$$

ここで、摩擦係数 μ 、粘性係数 c 、弾性係数 k は、

$$\mu = -\frac{4\pi l \beta \gamma}{N_r r T} \quad (4)$$

$$c = \frac{2I\beta}{r^2} \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{r^2} \left(\frac{4\pi^2 I}{T^2} - mgl \right) \quad (6)$$

と表される。ここで T は関節運動の周期である。

実験により得られた振幅減衰曲線を式(3)で近似し、式(4)~(6)の各パラメータ μ 、 c 、 k を同定した。

2-2 膝関節振り子実験

本研究の膝関節振り子試験システムの概要を Fig. 2 に示す。これは脛骨側を固定する支持部と大腿側に取り付ける振り子部 (高さ 1.0 m、質量 1.3 kg) から構成される。測定対象として、日本白色家兎膝関節を用いた。膝関節資料の大腿骨および脛骨部を円筒アクリルパイプ (長さ 62 mm、外径

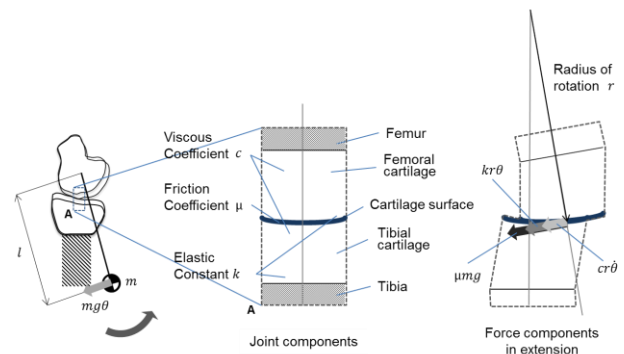


Fig. 1 Schematic of mechanical model of knee joint motion with friction, viscous and elastic properties.

20 mm、内径 14 mm) に骨セメントで固定し、それぞれ試験機支持部および振り子部に固定した。振動中の振り子の

運動は、2つのレーザー変位計 (LK-G30, Keyence) およびコントローラ (LK-G3000, Keyence) により振り子部側面までの側方変位を測定した。また、脛骨部固定部に6軸力センサを設置し、膝関節面垂直抗力を算出した。

3. 結果と考察

Fig. 3 に、摩擦係数、粘性係数、弾性係数と膝関節角度の比較をそれぞれ示す。これらは試験片 $n=7$ の平均を示しており、エラーバーは標準偏差を示している。これらのグラフより、摩擦係数は 90° で最も大きな値を示し、膝関節角度が大きくなるほど減少した。粘性係数、弾性係数は、膝関節角度の大きさに関わらず一定値を示した。

本研究では、膝関節面垂直抗力の測定を行い、摩擦係数の補正を行った。しかし、従来の手法では、膝関節面垂直抗力を振り子質量と同等と仮定し、一定値としていた。Fig. 4 に示すように、膝関節面垂直抗力は膝関節角度により変動し、条件ごとに測定する必要があることがわかった。以上より、本手法を用いることで、より正確な膝関節機能評価を行うことができることを確認できた。また健常膝と OA モデル膝の測定結果を Fig. 5 に示す。弾性には差が見られなかったのに対し、摩擦および粘性係数には顕著な差が見られた。このことから、本手法は OA 膝に対する機能評価手法として有用であることが確認できた。

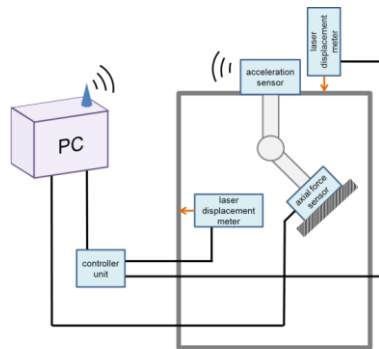


Fig. 2 Schematic of pendulum testing system for knee joint.

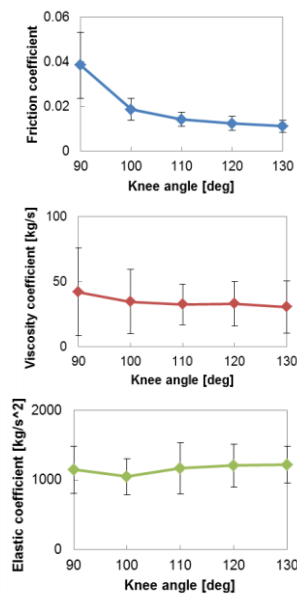


Fig. 3 Friction, viscosity and elastic coefficients vs joint angle of rabbit knee joint

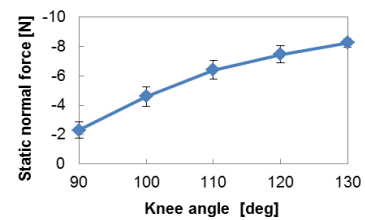


Fig. 4 Normal joint force at different knee flexion angle

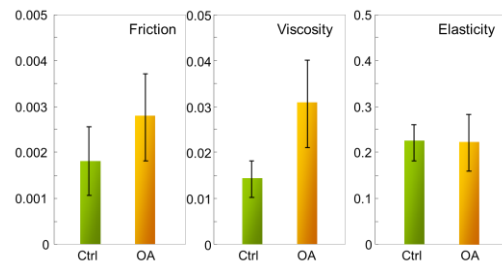


Fig. 5 Friction, viscosity and elastic coefficients of healthy vs OA rabbit knee joint

参考文献

- (1) Mabuchi, K. et al., The effect of additive hyaluronic acid on animal joints with experimentally reduced lubricating ability, *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 28 (1994), pp. 865-870.
- (2) Kawano, T. et al., Mechanical effects of the intraarticular administration of high molecular weight hyaluronic acid plus phospholipid on synovial joint lubrication and prevention of articular cartilage degeneration in experimental osteoarthritis, *Arthritis & Rheumatism*, Vol. 48 (2003), pp. 1923-1929.
- (3) Kawai, N. et al., Influence of additive hyaluronic acid on the lubricating ability in the temporomandibular joint, *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 70A (2004), pp. 149-153.
- (4) Igarashi, T. et al., Therapeutic effects of intra-articular ultra-purified low endotoxin alginate administration on experimental osteoarthritis in rabbits, *Cartilage*, Vol. 3 (2012), pp. 70-78.
- (5) Crisco, JJ. et al., Assuming exponential decay by incorporating viscous damping improves the prediction of the coefficient of friction in pendulum tests of whole articular joints, *Proc. IMechE, Part H; J. Engineering in Medicine*, Vol. 221 (2006), pp. 325-333.
- (6) Drewniak, EI. et al., Comparison of two methods for calculating the frictional properties of articular cartilage using a simple pendulum and intact mouse knee joints, *Journal of Biomechanics*, Vol. 42 (2009), pp. 1996-1999.
- (7) Noble, P. et al., A pendulum test as a tool to evaluate viscous friction parameters in the equine fetlock joint, *the Veterinary Journal*, Vol. 188 (2011), pp. 204-209.