

共同研究 報告書

○ 脚矯正用トレーニング器具に用いるばねに関する 人間－機械系設計

共同研究者：きたの均整院

報告者：香川大学工学部 知能機械システム工学科

井上 恒

2014年1月7日

きたの均整院と香川大学で開発中の O 脚矯正用器具の開発では、股関節外旋運動のトレーニングを行うことで O 脚の矯正を目指している。一般的な O 脚矯正では、直立時に膝に外側から内側へ力を加えたり、内転筋のトレーニングによって股関節の内転を促したりすることによって行われている。しかし、これらの矯正方法には効果がみられない、又は、効果の程度に個人差が大きいと言われている。そのため、きたの均整院では新たな矯正方法を開発した。それは、股関節外旋筋群のトレーニングを行うことにより、直立時の下肢を構成する骨格のアライメント全体を修正する方法である。きたの均整院では独自に試作機を作成してトレーニング器具の開発を進めている。そこで本報告書では、ヒトの股関節外旋運に関する検討を行い、それに基づき、きたの均整院と開発中のトレーニング器具に用いるばねについて検討を行う。

1. ヒトの股関節外旋機能について

ヒトの股関節外旋の可動域は、個人差はあるが 50° 程度[1]である。また、膝関節を 90° 屈曲した状態で、秒速 30° で外旋運動中での最大発揮モーメントを計測した報告[2]では、図 1 に示す結果が得られている。なお、このときの被験者は、健康な成人女性 37 名（年齢 19.8 歳，体重 59.44 kg）である。なお、図 1 内の直線は、Gupta et al. (2004)のデータに回帰直線をあてはめたものである。

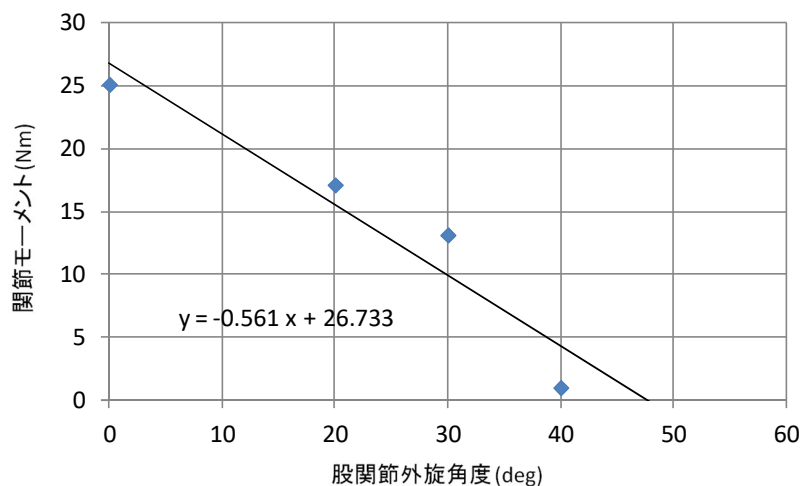


図 1 股関節外旋角度と発揮（股関節外旋）モーメント

図中の式は回帰式を示し、 x は股関節外旋角度、 y は関節モーメントを意味する。

(Gupta et al. (2004) [2]の掲載データより作図。回帰直性および回帰式を追加。)

この回帰式では、次の (1) 式のように各係数が定められた。

$$\tau = -0.56\theta + 26.73 \tag{1}$$

ここで、 τ は股関節外旋モーメント (Nm)、 θ は股関節外旋角度 (度) を表す。解剖学的肢位で膝の関節軸が前額面と平行(つま先が前方)であるときに股関節外旋角度は 0° となり、外旋する(つま先が側方に向く)に従い正の値が増大する。

また、上記の関節トルクは秒速 30° の外旋運動として得られている。ここで、最大発揮モーメント(等尺性最大発揮モーメント)を推定する。上記の外旋運動を、その最大速度の30%程度と見積もると(筆者の経験的勘)、筋の力-速度関係より、等尺性収縮では2倍程度(モーメント)が発揮されると考えられる[3]。そこで、図1中の回帰式((1)式)の各係数を2倍することによって、等尺性最大発揮モーメントが推定される。ここから、当該論文の被験者の平均体重に対する日本女性の平均体重[4]の比(0.87)を各係数にさらにかけることにより、下記の(2)式を得る。この式による推定値を、日本女性の平均値(外旋モーメントの最大値)と仮定する。

$$\tau_j = -0.98\theta + 46.52 \quad (2)$$

2. トレーニング器具に用いるばねについて

2-1. 力学モデル化

まず、開発中のトレーニング器具を図2のようにモデル化し、力学モデルを作る。 L_0 はばねの自然長、 L_1 はばねの伸びの長さ、 r は回転半径(回転中心からばねの設置点までの距離)、 θ は股関節外旋角度、 F は片方の足からばねに加わる力($-F$ はばねの張力)、 M は股関節外旋モーメントを示す。なお、両脚は同じ外旋運動を行うものとする。

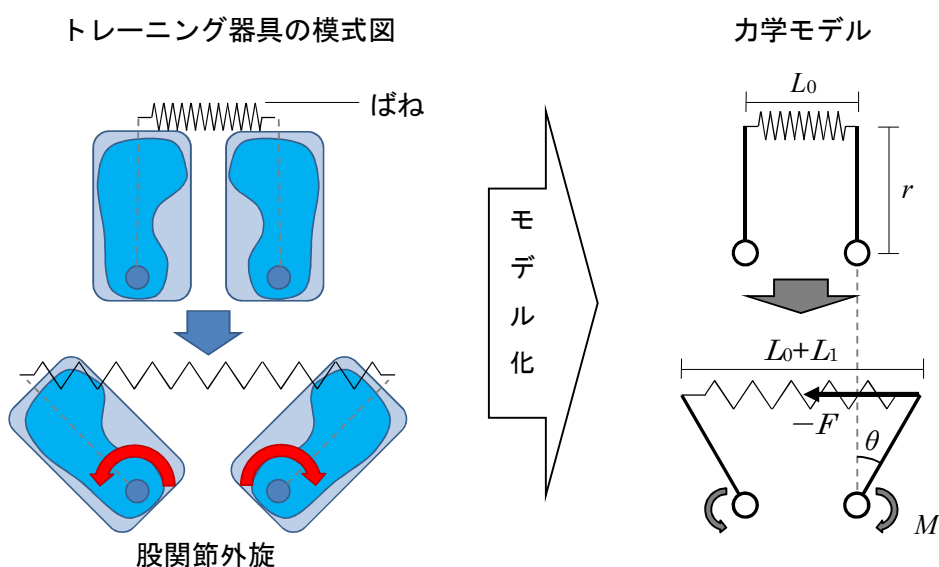


図2 トレーニング器具の解析用モデル化

このトレーニング器具の目的は股関節外転筋力を強化する点にあるが、速度の遅い外旋運動を伴うことが本器具の特徴である（関節運動が伴わなくても、筋力トレーニングは可能）。そこで、ばねに加える力 F と股関節モーメント M を導出するに当たり、前述の等尺性発揮モーメントとの対応を図ることも兼ね、静力学的な導出を行う。ばねに加える力 F と股関節モーメント M は以下の式によって得られる。

$$\begin{aligned} F &= kL_1 \\ &= 2k r \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$M = rF \cos \theta \quad (4)$$

ただし、 k はばね定数（正の値）とする。また、股関節外旋モーメント M と外旋角度 θ 、および、ばね定数 k の関係は、(2)式を(3)式に代入することによって、次式のように得られる。

$$M = 2r^2 k \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

上記のように、股関節外旋に必要な関節モーメント M は外旋角度 θ の関数として導出される（ r と k は事前に設定する定数とみなす）。

2-2. ばね定数の設計

次に、トレーニング効果が見込まれるような股関節外旋モーメント M が要求されるばね定数 k を検討する。実質的には、(2)式と(5)式から、適切なばね定数 k を算出する。先にも述べたが、本器具の特徴は、実際の外旋運動を伴うことである。そこで、 40° 程度外旋可能なようにばね定数を設計する。(6)式のように、(2)式と(5)式が股関節外旋位 40° で交点を持つように k を定める（図3）。このとき、回転半径 r は試作機の値、 0.23 m を用いた。

$$\begin{aligned} M &= \tau_j \\ 2r^2 k \sin \theta \cos \theta &= -0.98\theta + 46.52 \\ k &= \frac{-0.98\theta + 46.52}{2r^2 \sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに θ に 40° を代入すると、 $k = 143.65 \text{ [N/m]}$ が得られる。

一般的に販売されているばねの定数は、カタログ等の記載によると 0.14 N/mm 程度の精度で記載されている。したがって、上記で算出したばね定数 k も $140 \sim 150 \text{ N/m}$ ($=0.14 \sim 0.15 \text{ N/mm}$) 程度として検討するのが適当と考えられる。ここで、上記で算出された k の値を 0.15 N/mm とし、ばね定数に弱め（ $2/3$ 倍）から強め（ 2 倍）の範囲を設定するならば、 $0.10 \sim 0.30 \text{ N/mm}$ の範囲が適当であると考えられる。また、 k を 0.15 N/mm としたが、例えば、この範囲で三段階の強度を設定するのであれば、中間の値を 0.20 N/mm としても大きな問題はないと考えられる。

図3は、(5)式に様々なばね定数を代入したときに、それぞれ股関節外旋に要求される

関節モーメントを表している。可動域の個人差を無視すれば、 $k = 50$ (0.05 N/mm) のとき、約 45° まで外旋可能である。ただし、外旋に要求される関節モーメントは小さく、トレーニング効果の期待が小さい。一方、 $k = 400$ (0.40 N/mm) では、外旋に要求される関節モーメントが大きくなりすぎ、十分な外旋運動ができないと推察される。

なお、 40° 股関節外旋位を取ったときに必要なばねの伸びは、0.30 m (300 mm) 必要である。

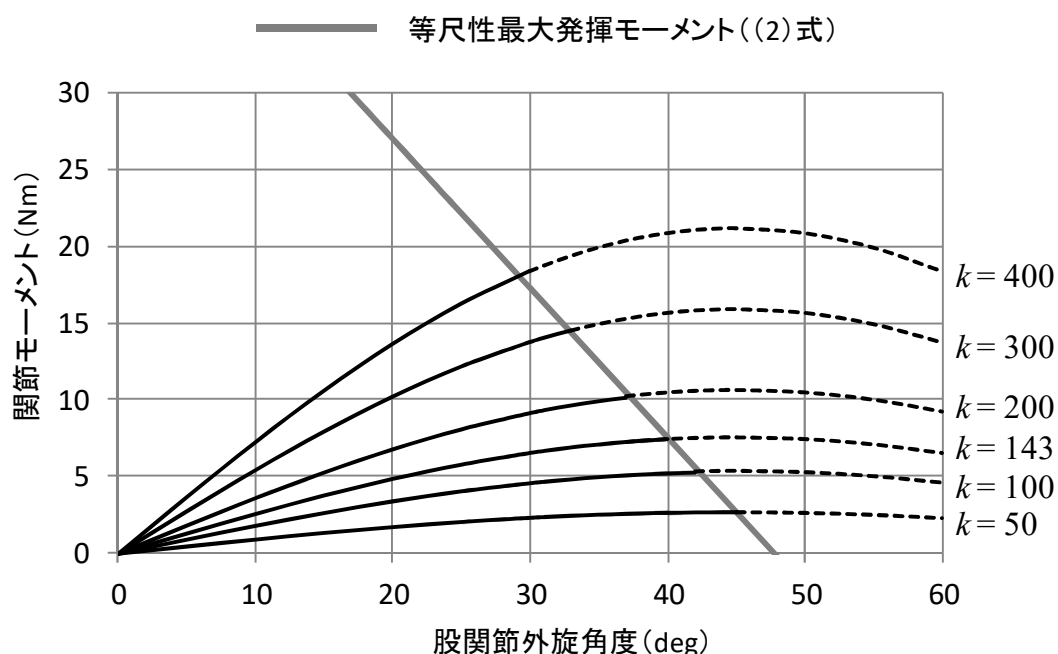


図3 ばね定数 k とトレーニング器具使用時に要求される関節モーメントの関係

3. 今後、改良または検討が必要と推察される点

3-1. ばねの伸び

上記のばね定数 (100~300 N/m) に対して、0.30 m 程度の伸びを持つばねは、既製品としてはあまり見られない。トレーニング器具の製造コストを考えると、既製品のばねを用いることが有用であるが、場合によっては特別に注文する必要がある。この問題を回避するには、(2) 式などにおける回転半径 r を小さくする必要がある。つまり、ばねの取付位置を回転中心に近付けることにより、必要なばねの伸びの量を短くすることができる。回転半径 r とばねの伸び L_1 は比例関係にある。そのため、 r を $1/2$ にすれば L_1 を $1/2$ にすることができる。ただし、(6) 式より、同じ関節角度に対して関節モーメントを要求するには、回転半径 r を小さくした場合、ばね定数 k を大きくする必要がある。

3-2. 初期姿勢（股関節外旋角度）

(6) 式より，本器具を使用した際に，股関節外旋に必要な関節モーメントは，どのようなばね定数 k や回転半径 r であっても 45° 外旋位の際にピークを迎える（図 3 参照）．それは，図 1 および図 3 に示すように，ヒトの股関節外旋モーメントの発揮特性とは異なっている．本器具の使用によって要求される関節モーメントが外旋位 45° で最大値となる理由は，図 2 のように足部を平行にした状態（股関節の内外旋なし）で，ばねが自然長となるようにモデル化しているためである．そのため，股関節を内旋位の状態のときにばねが自然長を取るようにすれば（内旋位の状態からスタートすれば），このピークの位置をずらすことができる．ヒトの股関節の内旋の可動域は 45° 程度[1]であるため，最大で 10° 程度内旋より（外旋位 30° 付近）にずらすことが可能と考えられる（図 4 参照）．

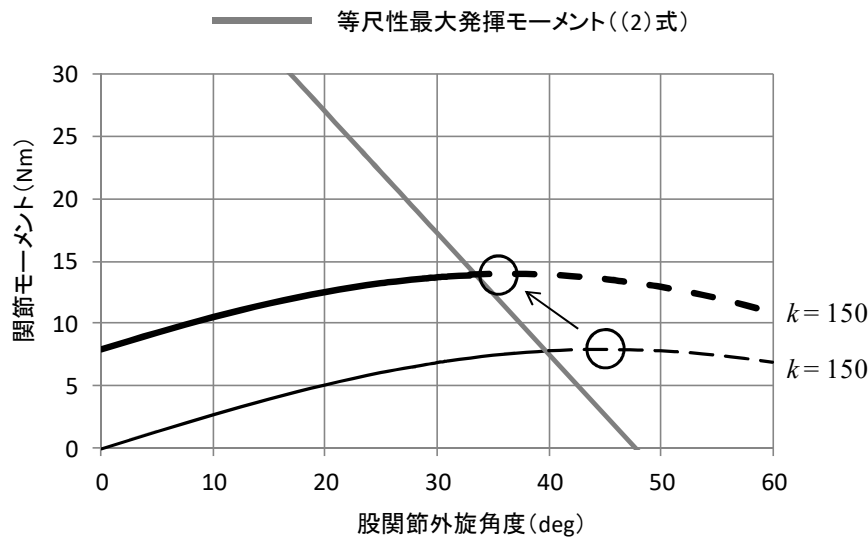


図 4 股関節内旋位を初期状態にすることによる関節モーメントの位相ずれの概念図
 図中の細い線は足部が平衡の状態（内外旋なし）から，太い線は 30° 内旋位から外旋を行う場合．

引用文献

- [1] Floyd, T. (訳 中村千秋) 『身体運動の機能解剖学 改訂版』. 医道の日本社. 2002. p. 127.
- [2] Gupta, A., Fernihough, B., Bailey, G., Bombeck, P., Clarke, A., Hopper, D. An evaluation of differences in hip external rotation strength and range of motion between female dancers and non-dancers. *British Journal of Sports Medicine*, 38, pp. 778-783. 2004.
- [3] Enoka, R. *Neuromechanics of Human Movement 3rd edition*. Human Kinetics. 2002. p.259.
- [4] Web サイト：日本人の平均身長・体重：統計 - Paroday (30～34 歳の平均体重 51.43 kg). <http://paro2day.blog122.fc2.com/blog-entry-9.html>