

足趾接地状態に起因する腰椎椎間板負荷の検討

システム工学群

知能メカトロダイナミクス研究室 1190126 羽坂 ユウ

1. 緒言

人間の足部は身体を支える基盤となっており、歩行時には足部によって接地時の衝撃吸収から離地の蹴り出し動作が繰り返し行われている。また、足趾は足部の機能を支えており、中足指節関節の伸展屈曲により主に蹴り出し時の駆動力を発揮する。

足趾の変形にはさまざまな種類があるが、近年、立位静止時や歩行中において足趾が地面に接地せず浮いた状態である「浮き趾」という症状を持った人の数が増加傾向にあることが整形外科などで問題となっている。

浮き趾を発症する主な原因として、昔のように裸足で歩くことが少なくなりサイズの合わない靴、またヒールやスパイクシューズなどの指先が狭くなるような靴を履き続けることなどが挙げられる。

浮き趾による主な症状として、腰痛、神経を圧迫することによる自立神経失調症、また転倒や骨折などが挙げられる。これらの症状は、浮き趾によって体重を足裏全体で支えていないことから引き起こされると考えられている。しかし、定量的な測定データを示した報告はほとんど見られず、特に歩行中の上体との関連性を示した研究は見られない。

本研究グループでは腰椎椎間板から腰への負荷を推定する方法を提案している。そこで本研究では、腰椎椎間板負荷推定法を用い、腰への負荷と足趾状態の関連性について調べることが目的とする。

2. 腰椎椎間板負荷推定法の概要⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

図1に人間の腰椎系を拡大した図を示す。姿勢が変化することで椎骨が動き、椎骨間にある椎間板が変形する。椎間板の大きな変形が腰への負荷を誘発する場合がある。本研究グループでは、椎骨は椎間板と比べると剛性が高く、剛体と見なせることから、姿勢変化による腰椎系の変化は椎間板の変形、すなわち椎骨間の隙間変化のみで決まると考えている。そのため、姿勢が変化したときの椎骨間の隙間変化がわかれば、椎間板にかかる負荷を相対的に導出できると考えている。

本研究グループでは、棘突起最後部（以下、椎骨端部）が

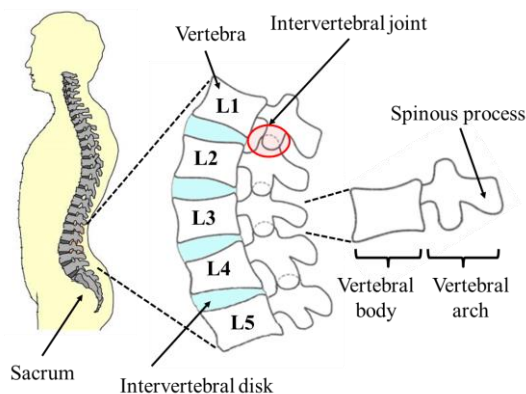


Fig.1 Lumbar vertebra

背中の体表面に近いところに存在することと腰椎系が円弧を描いていることに着目し、各椎骨の椎間関節がピンジョイントであると仮定し弾性変形を無視することで、体表面から測定した椎骨端部の位置座標を基に腰椎部を2次関数にカーブフィットして曲率半径を導出する。この曲率半径が小さいと椎骨間の隙間が広がるため、椎間板にかかる負荷は小さくなる。それとは逆に、曲率半径が大きくなると隙間が狭くなるため、負荷が大きくなる。曲率半径と椎骨間の隙間変化にはこのような関係があるため、曲率半径を用いて椎間板にかかる負荷を推定することができると考えている。

腰椎部を2次関数で近似して曲率半径を導出する方法について述べる。腰椎系をはりと考えると近似した2次関数をたわみ曲線とみなすことができるので、曲率半径を ρ 、2次関数を $y(x)$ とすると、曲率半径 ρ は式(1)により導出することができる。

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{d^2 y(x)}{dx^2} \quad (1)$$

式(1)より、右边は定数となるため、腰椎部における曲率半径が導出可能となる。

体表面の腰椎部の測定方法としてはいろいろ考えられるが、ここでは、5つの腰椎椎骨端部の位置にマーカーを貼り付け、光学式モーションキャプチャで撮影してマーカーの位置座標を得る。マーカーの位置座標から曲率半径が式(1)より求まる。



Fig. 2 Marker position

3. 静止中における異なる足趾状態での椎間板負荷推定実験

3.1 実験内容と結果

ここでは、静止中において足趾接地した姿勢と浮き趾姿勢での負荷推定を行う。測定方法としては、マーカーを胸椎3個、腰椎5個、仙骨上部1つの計9か所に貼り（図2）、床反力計の上に乗って実験を行う。今回は3秒間測定し、その平均値を用いて、被験者が足趾接地、浮き趾それぞれの状態で腰椎に貼付した5つのマーカーから静止した場合の負荷を推定した。いずれの場合も立位時において2回ずつ測定し、20代男性の被験者3名で行った。今回の被験者は浮き趾症状が無かったため、足趾を持ち上げて模擬的に浮き趾とした。

同時計測した床反力計の出力データを図3に示す。図の青の点が足趾接地した姿勢、橙の点が浮き趾姿勢での圧力中心の位置である。図3より、被験者3名とも模擬的な浮き趾状態により圧力中心が体の後方へ下がっていたため、浮き趾を再現できたと確認している。

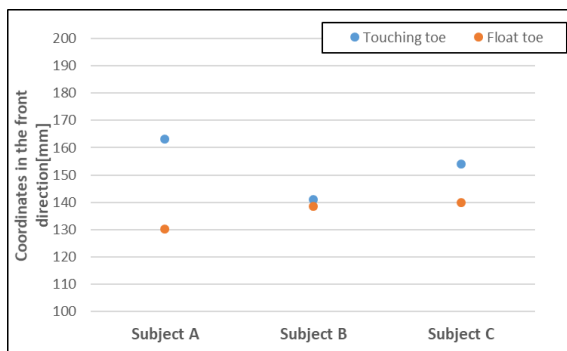


Fig.3 Measured value of pressure center in stationary standing

次に、図4に被験者3名の1試行分の足趾接地した姿勢と浮き趾姿勢での腰椎椎間板負荷の推定結果を示す。被験者ごとに、足趾接地した姿勢での負荷を100として正規化している。図の青の線が足趾接地した姿勢、橙の線が浮き趾姿勢での負荷推定結果である。図4より、被験者A、Bは足趾接地と浮き趾で負荷比に大きな差は見られなかった。被験者Cの負荷比は足趾接地より浮き趾のほうが上昇する結果が得られた。

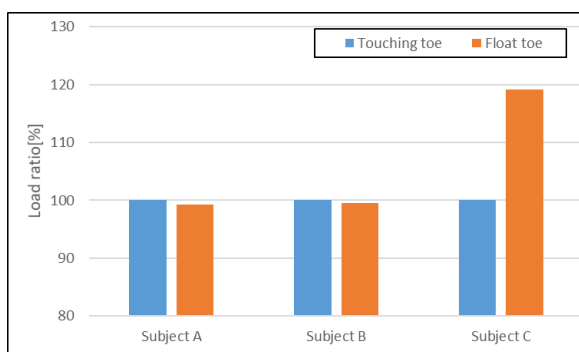


Fig.4 Result of load estimation in stationary standing

3.2 実験結果の考察

被験者のうち、足趾接地と浮き趾で負荷比が変わらない者と浮き趾で負荷比が上昇する者に分かれる結果となった。負荷が上昇した被験者Cは、浮き趾で体が後ろに傾くことにより後ろに倒れないように上体を屈曲してバランスを取ったため、負荷が上昇したと考えられる。また、負荷が変わらなかった被験者A、Bは、腰椎部の形状を保ったまま後ろに反るように体を移動させたため、腰椎の負荷比に変化がなく、圧力中心だけが後方へ下がったと考えられる。

4. 歩行中における異なる足趾状態での椎間板負荷推定実験

4.1 実験内容と結果

ここでは、通常歩行と浮き趾歩行での負荷推定を行う。測定は、マーカーを頸椎1個、胸椎3個、腰椎5個、仙骨上部1つ、踵2個の計12か所に貼った。今回は歩行路を用意し、被験者が通常歩行、また浮き趾で8歩分歩行した場合の負荷を推定した。いずれの場合も測定開始から2秒間静止後に歩行し、2回ずつ測定し、20代男性の被験者3名で行った。図

5に被験者1名分の通常歩行と浮き趾での歩行の5歩目接地から7歩目接地までの腰椎椎間板負荷推定結果を示す。

図5の縦軸では通常歩行の開始時での負荷を100として正規化している。横軸は歩行周期であり、5歩目接地から7歩目接地までを100%で表示している。図の青の線が通常歩行時の負荷、橙の線が浮き趾歩行時での負荷を示している。図5より、被験者Aの負荷比は通常歩行に比べ浮き趾のほうが上昇する結果となった。また、他の被験者においても同様の傾向が得られた。

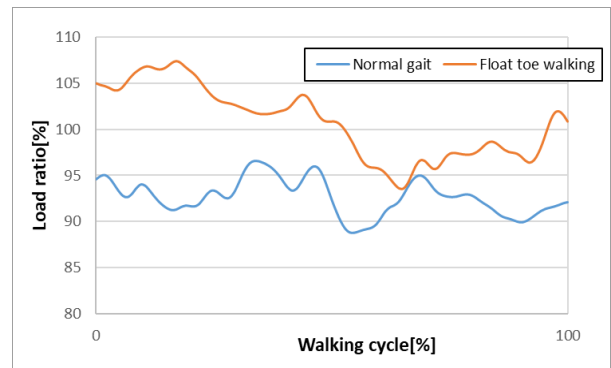


Fig.5 Result of load estimation during walking of subject A (Extract from 5th step to 7th step)

4.2 実験結果の考察

被験者全員の負荷比が浮き趾での歩行で上昇したことから、浮き趾での歩行は通常歩行に比べ上体が後ろへ傾くため、腰椎部を前傾させて歩く。よって腰への負荷が増大したと考ええる。

5. 結言

浮き趾による腰への負荷を調べるため、異なる足趾状態での静止中と歩行中の腰椎椎間板負荷推定実験を行った。その解析結果から、主に歩行中において腰への負荷が上昇することが判明し、静止中、歩行中においてそれぞれ浮き趾になったときの上体の動きへの影響を考察した。また浮き趾により負荷が減少するケースはなかった。

以上の結果より、日常的に浮き趾のまま生活を続ければ腰に悪い影響を与え、腰痛などの症状を引き起こす原因となる可能性が高いと考えられる。これらの結果をもとに浮き趾の治療や予防のアプローチへとつなげていきたい。

参考文献

- 芝田京子, 井上喜雄, 岩田祥孝, 片川準也, 藤井涼, 腰椎系における椎間板負荷の非侵襲的な推定法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 791, 2012, pp. 130-141.
- 木村弘樹, 芝田京子, 井上喜雄, 飯塚卓郎, 非侵襲的な腰椎椎間板負荷推定法の開発, 中四国学会講演論文集, Vol. 54, 2016, pp. 1012-1-1012-3.
- 鈴木佑 他, 動作中における腰椎椎間板負荷の非侵襲的な推定, 日本機械学会 中国四国学生会 第47回学生員卒業研究発表講演会, 2017, pp. 313-1-313-3