

## 障害物を越える際の歩行動作分析 —— 高さの違いによる下肢関節トルクの変化 ——

宮 川 健

川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科

(平成9年5月21日受理)

### An Analysis of The Moment-of-Force on Joints when Stepping Over Obstacles of Different Heights

**Takeshi MIYAKAWA**

*Department of Health and Sports Science*

*Faculty of Medical Professions*

*Kawasaki University of Medical Welfare*

*Kurashiki, 701-01, Japan*

*(Accepted May 21, 1997)*

**Key words** : locomotion, obstacle, control, moment-of-force, link-segment

#### 緒 言

歩行は、人間にとって最も基本的な移動手段である。同時に、競歩や登山、そして遠足などのスポーツやレクリエーションとして展開されるきわめて応用的な身体運動でもある。古くから歩行のメカニズムには関心が寄せられ、スポーツ、教育、医学、人間工学、リハビリテーションなどの幅広い分野で数多くの研究と報告がなされている<sup>1-5)</sup>。近年では、体力の維持・増進のための有酸素運動として注目されるようになり、特に中高齢者の間ではウォーキングやハイキング、夏山登山など生涯体育としての歩行運動を実践するひとが増加している<sup>6)</sup>。また、日本は高齢化社会を迎え、高齢者の転倒・つまずきなど日常生活の安全管理の面からも歩行に関心が寄せられている。

元来、歩行は、姿勢の乱れを補償するために四肢の律動的なパターンが脊髄レベルで生み出されるひとつの反射運動であると考えられている<sup>1)</sup>。しかしながら、自分の意志で簡単に歩く方向を変えることができるし、その速度を変えることもできる。すなわち大脳など上位中枢が関与する随意運動でもある。その意味で、歩行は脊髄レベルの反射的側面と大脳レベルの随意的側面を合わせもった極めて特殊な運動といえる。そして、歩行中に障害物をまたいで越える動作は、障害物の高さや幅などの環境の変化に対応した随意的な調節を必要とすることから、特に歩行の随意的側面が強調される動作である。環境の変化に対応してどのように歩行運動が行なわれるかについては、反射による姿勢調整という立場からは数多く研究されているものの<sup>7,8)</sup>、スキル論的な立場からその対応の仕方に言及したも

のは少ない<sup>9,10)</sup>。本研究では、歩行運動の随意的な側面、特に歩行中に障害物をまたいで越える動作に着目した。

ところで、近年、種々の側定装置や計算機の発達によって、モデルやコンピュータシミュレーションを用いた研究が行なわれるようになった。とりわけ、人間工学や体育、リハビリテーションなどの分野では、運動中の関節に作用する力（負荷）やトルク（関節を回転させようとする力）を推定する研究や、それらの結果をもとに様々な動きを予測する研究が行なわれている<sup>11)</sup>。これらの手法を利用すれば、障害物を越える際に作用する関節反力やトルクを比較的容易に推定することが可能である。

そこで本研究では、リンクセグメントモデルを用いて下肢の関節トルクを推定し、歩行中に障害物をまたいで越える際に発揮される遊脚の関節トルクが、障害物の高さに対応してどのように調節されているかを明らかにすることを目的とした。

## 方 法

被検者には、身長175cm、体重67kg、年齢36歳の健康な成人男性1名を用いた。実験室内に設置した全長10m幅80cmの歩行路の中央に、厚さ2cm幅80cmの木板を進行方向と直交するように置き、被検者にそれを越えさせた。常に同側の

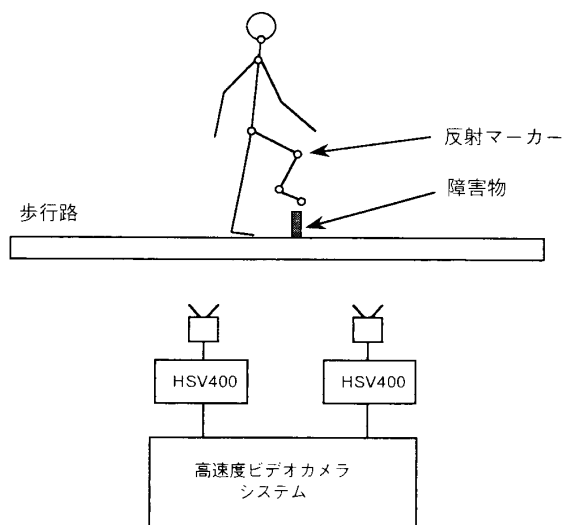


図1 実験の構成

脚で障害物を越えさせるため歩き始めの位置だけを規定し、歩行速度や歩調に関する指示は与えず自然に歩行させた。1試技ごとに木板の高さを変え、合計8種類の高さをランダムに3回ずつ行なわせた。木板の高さは0cm（2cm幅のラインテープのみ）から30cmまで5cm毎の高さに設定した。そして、被検者の頭頂点、耳珠点、肩峰点、転子点、脛骨点、外果点、第5中足骨頭点に直径1.5cmの球形反射マーカーを取付け、障害物を越える際の歩行動作をナック社製の高速ビデオカメラ HSV 400を用いて、シャッター速度1/1000秒、毎秒200フレームの条件でビデオ撮影した。実験の構成を図1に示した。

障害物を越える際の遊脚における足関節、膝関節、股関節の発揮する筋モーメント（トルク）および関節反力をリンクセグメントモデル<sup>12)</sup>を利用して推定した。トルクの発揮方向の定義は図2に示したとおりである。身体分節（セグメント）の質量、慣性モーメント、および重心位置は M. Dempster<sup>12)</sup> のデータを用いた。実験から得られた位置および関節角度のデータは、カットオフ周波数50Hzのデジタルフィルター（パ

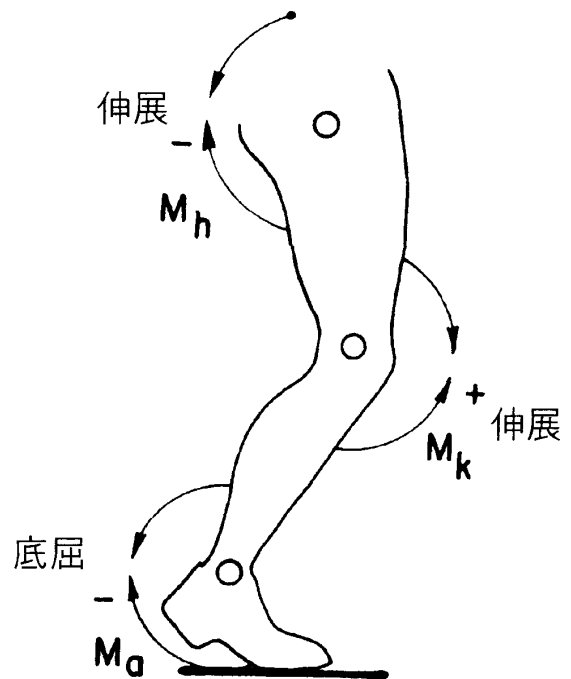


図2 リンクセグメントモデルにおける関節トルクの方向定義

ターワースフィルター) を用いてノイズ除去処理を行なった。そして、1ストライドの遊脚期において、足部が地面から離れて障害物を越えるまでを第1局面、障害物を越えて地面に着地するまでを第2局面として、それぞれの局面における足関節、膝関節、股関節のトルクの最大値(ピークトルク)を算出した。そして、障害物の高さごとに関節の発揮したピークトルクを比較した。統計処理は1元配置の分散分析(Stat View 4.01 Factor-ANOVA)を用い、有意水準は5%とした。多群間の比較はFisherのPLSDを用いた。

結 果

歩行時のスティックピクチャーおよび膝関節トルクの変化を図3、4に示した。また、歩行中の第1局面における膝関節のピークトルクと障害物の高さとの関係を図5に示した。

足関節の第1局面では、すべての高さにおいて2.4~2.8Nmの背屈トルクが発揮された。障害物の高さの違いによる有意な差は認められなかった。第2局面では、障害物0cmの高さにおいてのみ1Nmを越える背屈トルクが発揮されたが、5~30cmの高さではトルクはほとんど発揮されていなかった。障害物0cmと5~30cmとの間に有意な差が認められた。また、スティックピクチャーより、障害物0cmの歩行においては着地前につま先をあげて着地する踵着地動作が行なわれ、高さ5cm以上の歩行では前足部による着地が行なわれたことが観察された。

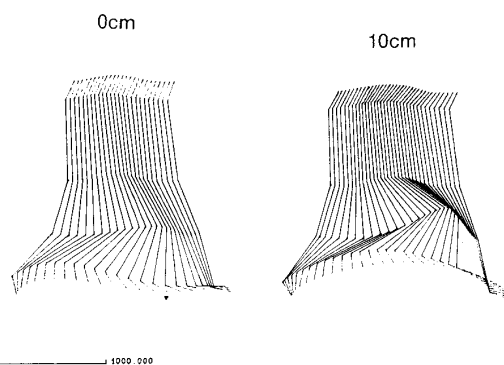


図3 障害物0cmおよび10cmの高さにおける歩行動作のスティックピクチャー

膝関節の第1局面では、障害物0cmにおいては伸展トルクが発揮され、5~30cmの高さにおいては屈曲トルクが発揮された(図4)。5~30cmの高さにおける屈曲のピークトルクは障害物の高さにもなって有意に大きな値を示した(図5)。すなわち、障害物が高いほど大きな屈曲トルクが発揮されていた。第2局面では、すべての高さで屈曲トルクが発揮された。有意な差は認められなかったものの障害物の高さが低いほど大きな屈曲トルクが発揮される傾向にあった。

股関節の第1局面では、足先が床面から離れる際に40~50Nmの屈曲トルクが発揮され、障害物の高さが異なってもトルク発揮パターンは近似していた。障害物の高さによる有意な違いは認められなかった。第2局面では、障害物0cmにおいては伸展トルクが発揮された後に着地が

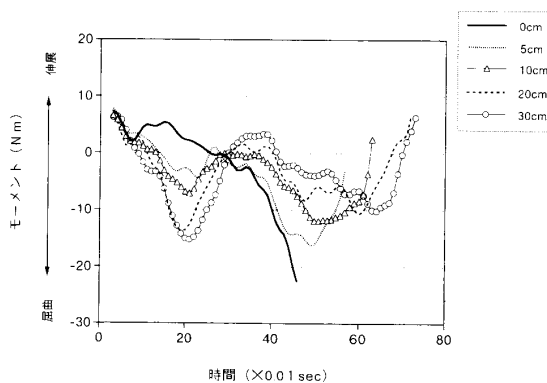


図4 障害物を越える際の遊脚における膝関節トルクの変化

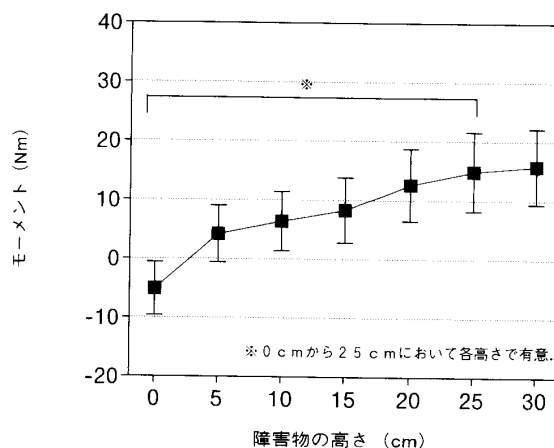


図5 第1局面における膝関節の屈曲ピークトルクと障害物の高さの関係

行なわれていたが、5 cm～30 cmにおいては伸展トルク発揮の後に再び屈曲トルクが出現し着地をむかえていた。しかし高さの違いによる屈曲トルクの大きさに有意な差は認められなかった。

### 考 察

歩行中に何かをまたいで越えるという観点から、高さ0 cmの歩行も他の高さと同様の障害物歩行として実験を行なった。しかしながら、高さ0 cmの歩行動作は通常の歩行動作とよく似ており、5 cm～30 cmの高さを越える歩行とはトルク発揮のパターンが大きく異なっていた。このことから、人はある高さ以下の極めて低い障害物を越える場合には通常の歩行動作パターンでそれを越えようとし、ある高さ以上の障害物を認知した場合にはじめて動作パターンを変えて障害物を越えるものと考えられる。今回の実験では0 cmと5 cmの間の高さを設定しなかったが、その間の5 cmに動作パターンが変化するポイント、すなわち運動の切り替わりポイントが存在している可能性があると考えられる。

足関節トルクは、障害物の高さによる違いがみられないことから、足部の高さ調整には関与せず、足部の着地がスムーズに行なわれることを目的とした最低限のトルク発揮にとどまっていることが考えられる。また、高さ5 cm以上の障害物歩行においてみられた前足部着地は、着地瞬間の足裏感覚（足関節を取り巻く筋の筋感覚を含め）を上位中枢に伝達することで、安全に障害物を越えるための姿勢調整に役立ってい

るものと考えられる。

膝関節では、足先が床面から離れた直後の屈曲ピークトルクが障害物の高さにもなって有意に増大した。このことから、膝関節の屈曲トルクは障害物を越える際の足部の高さを決定する重大な要因であることが推察される。従って、膝に障害を持つ人や、膝屈曲のための筋力が衰えた人の場合、トルク発揮が十分に行なわれないことを原因とするつまずきの可能性が考えられる。

股関節のトルクに関しては、障害物の高さによる有意な違いは認められなかった。また障害物の高さが異なってもトルク発揮パターンは近似していた。しかしながら、股関節の最大屈曲角度と足部の高さには高い相関があることから<sup>13)</sup>、股関節の場合はトルクの大きさ（ピーク）ではなく、トルクによるパワーや仕事量などによって足部の高さの調整がなされるものと考えられる。

### 結 論

限られた被検者ではあるが、これまでの結果によって以下の結論が得られた。

1) 歩行中に障害物を安全に越えるための足部の高さ調節には、足先が地面を離れた直後における膝関節屈曲トルクの大きさが重要な役割を担っている。

2) 障害物の高さ5 cm以下において、通常歩行の動作パターンから障害物歩行の動作パターンへと切り替えが行なわれる高さが存在する。

### 文 献

- 1) 猪飼道夫 (1972) 歩行運動の生理, 生体の運動機構とその制御. 真島英信他, 東京, pp326-341.
- 2) Dietz V et al. (1979) Neuronal Mechanisms of Human Locomotion. *J. Neurophysiology*, **42**, 1212-1222.
- 3) 大道 等 (1979) 歩行の動作記述と外的仕事の算出. 体育の科学, **29**, 23-27.
- 4) 土屋和夫監修, 臨床歩行分析懇談会編 (1989) 臨床歩行分析入門. 医歯薬出版株式会社, 東京, pp61-94.
- 5) 山崎昌廣, 佐藤陽彦 (1990) ヒトの歩行 —— 歩幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から ——. *J. Anthropol. Soc. Nippon*, **98** (4), 385-401.
- 6) 総務庁統計局 (1991) 社会生活基本調査報告書. 第3巻, 全国生活行動編, 東京.
- 7) Conrad B et al. (1986) Motor patterns in human gate, Disorders of Posture and Gate. (eds.) Bles, W.

et al, pp53—67.

- 8) Dietz V et al. (1988) Fast head tilt has only a minor effect on quick compensatory reactions during the regulation of stance and gait. *Exp. Brain Res.*, **73**, 470—476.
- 9) Patla AE and Rietdyk S (1992) Effect of obstacle height and width on gait patterns. 13th International Congress on Biomechanics abstract, pp455—456.
- 10) 宮川 健 (1992) 歩行動作の調整能に関する研究 ——障害物を越える際の下肢動作に着目して——. 広島大学修士学位論文.
- 11) 藤井範久 (1995) 身体運動のコンピュータシミュレーション. *体育の科学*, **45**, 227—238.
- 12) Winter DA (1987) *The Biomechanics and Motor Control of Human Gait*. University of Waterloo Press, Canada, pp80—84.
- 13) 渡部和彦, 宮川 健 (1993) 高齢者の歩行調節機能に関する研究II ——障害物を越える際の歩行動作に着目して——. *体育科学*, **21**, 239—247.