

障害物にアプローチする方向が跨ぎ越え動作に与える影響

Effects of Approaching Direction to the Obstacle Avoidance Movements

○ 小林吉之（産業技術総合研究所） 泉川浩（早稲田大） 藤本浩志（早稲田大）

Yoshiyuki KOBAYASHI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Hiroshi IZUMIKAWA, Waseda University

Hiroshi FUJIMOTO, Waseda University

Key Words: Falling, Tripping, Obstacle Avoidance

1. はじめに

転倒が生じる要因については、実際に転倒を経験した者に対する様々なアンケート調査によってその概要が調べられている^{1) 2)}。しかしそのような調査は、転倒経験者に対し転倒後にその原因などを聞くという手法がとられている。そのため得られた回答は経験者の主観に基づいており、転倒時の詳細な原因を客観的に評価することは難しい。そこで上述の調査などで得られた要因を、実験的に再現し、動作解析などの手法を用いて客観的に評価しようとする研究も数多く行われている^{3) 7)}。そのような手法の一つに障害物の跨ぎ越え動作に着目した研究がある^{5) 7)}。

しかしこれまで行われてきた障害物回避動作に関する研究では、被験者は、上記の調査などで報告されてきた障害物のほとんどを完全に回避できることが示されており、その結果転倒に至りやすい人や障害物の特徴が極端なものとなってしまっているケースが多い。このような状況の背景には、これまで行われてきた研究ではいずれも障害物に対する被験者のアプローチが一律で、障害物の正面からまっすぐにアプローチし跨ぎ越える際の動作しか評価されてこなかったという点が指摘できる。それに対し我々は日常生活において、正面からのみ障害物にアプローチするとは限らない。そのため、これまで行われてきた障害物回避動作に関する研究では安全に回避できると報告されてきた人や障害物でも、アプローチする方向によっては大きく影響を受ける可能性が考えられる。例えば障害物に対して斜めからアプローチした場合、先に跨ぎ越えた足の着地位置付近に障害物があるために、足部と障害物の接触を避けようとして支持面が十分確保できなくなることが懸念される。そこで本研究では、障害物に対し様々な方向からアプローチした際の障害物跨ぎ越え動作を、運動学的な手法を用いて定量的・客観的に評価することを目的とした。

2. 方法

2-1 被験者

被験者は10名の若年健常者(平均年齢21.9歳±SD1.2)であった。実験前被験者には、下肢における過去の外傷・疾病歴などについて口頭で確認し、実験当日の安全な二足歩行に影響を受ける要因がないことを確認した上で実験を行った。なお、本研究のプロトコールはすべて早稲田大学「ヒトを対象とする研究等倫理審査委員会」により承認され、被験者らは実験前に書面と口頭による説明を受け同意した上で実験に参加した。

2-2 実験装置

実験は8mほどの歩行が可能な実験室で行った。本研究の目的を達成するために試行毎に障害物を水平面上で様々な角度に傾け、被験者は毎試行同一の場所から障害物にアプローチした。これにより、見かけ上障害物に対するアプ

ローチの方向を変えた。

本研究では障害物にアプローチする角度について、被験者が障害物の正面からアプローチする条件を±0度条件として設定し、そこから±20度、±40度、±60度の計7条件を設定した。正負の符号に関しては、障害物を先に跨ぎ越える足によって角度の効果が変わってくるのが考えられたため、被験者が先に障害物を跨ぎ越えた足によって符号を変える必要があった。そこで被験者が右足で先に障害物を跨ぎ越える場合には、0度条件に対して障害物を反時計回りの方向に回転させる条件をそれぞれ+20度、+40度、+60度の条件とし、時計回りの方向に回転させる条件をそれぞれ-20度、-40度、-60度の条件と設定することとした。一方被験者が左足で先に障害物を跨ぎ越える場合は、0度条件に対して時計回りの方向に障害物を回転させる条件をそれぞれ+20度、+40度、+60度の条件とし、反時計回りの方向に回転させる条件をそれぞれ-20度、-40度、-60度の条件と設定することとした。先に障害物を跨ぎ越える足の選択については『2-4 実験手続き』にて詳述する。また障害物の高さについて、先行研究で実際に転倒要因となった障害物に基づいて、25mm(窓の棧や電源ケーブルの高さ)、50mm(敷居や配管の高さ)、及び150mm(緑石の高さ)の3条件を設定した。これは障害物の高さによってアプローチする方向の効果が異なる可能性が考えられたためである。なお、これらの障害物はすべて厚さ5mmの木製の合板で製作し、万が一のつまずきに備えて容易に倒れるように設置した。上述の条件間で被験者の跨ぎ越え動作を比較するために、後述する被験者体表の解剖学的部位に貼付した赤外線反射マーカの空間座標を、三次元動態計測装置VICON612(Oxford Metrics社製)を用いて100Hzで記録した。

2-3 実験デザイン

本研究における独立変数は、障害物に対してアプローチする方向(+60°~-60°:7条件)と高さ(25mm, 50mm, 150mm:3条件)の2要因とした。また従属変数は、跨ぎ越え動作時のつまずきや支持面に大きく影響すると考えられる下記の変数を被験者内要因として比較した:変数1)『障害物を先に跨ぎ越えた足のつま先クリアランス(Toe Clearance:TC)』;変数2)『障害物を跨ぎ越えた際の歩幅(Step Length:SL)』;変数3)『障害物を跨ぎ越えた際の歩隔(Step Width:SW)』;変数4)『障害物を跨ぎ越えた際の歩行速度(Walking Speed:WS)』。これらの変数は先行研究^{5) 7)}に基づきそれぞれ以下のように定義した。変数1)TCはつまずきに関する変数である。この変数は、障害物を跨ぎ越える際の際のつま先と障害物間のマージンを表わすため、この変数が小さくなればなるほどつまずきやすくなると考えられる。本研究では、先行研究に習い第一中足骨頭

背側に貼付したマーカが障害物の真上に来た時点における、マーカの高さ (z 軸の値) と障害物の高さとの差として定義した。変数 2) 及び 3) はいずれも障害物を乗り越えた後の支持面の確保に関する変数として計測した。これらの変数が小さいと形成される支持面も小さくなるため、SL や SW が小さくなる乗り越え動作は支持面が十分確保できておらず不安定な乗り越え動作と考えることができる。本研究では、先に障害物を乗り越えた足が接地した時点における、左右それぞれの踵骨最後部に貼付したマーカ間の前後方向の距離 (y 軸の距離) を変数 2) SL と、左右方向の距離 (x 軸の距離) を変数 3) SW 定義した。変数 4) 歩行速度に関しては、先行研究においてこの変数が歩幅や歩隔に大きな影響を与えることが示されているため⁸⁾、変数 2) 及び 3) を理解する上での補助的なパラメータとして計測し、仙骨に貼付したマーカの速度として定義した。各条件は 5 試行ずつ繰り返し、計 105 試行をランダムに行った。

2-4 実験手続き

障害物に正面からアプローチした際には、人はより安全に乗り越えるために障害物の位置や高さに応じて歩容を調整することが知られている⁹⁾。このことから障害物にアプローチする方向が変わった場合でも同様の調整が行われることが考えられた。特に先に障害物を乗り越える足は、上述の通り乗り越え動作後に確保する支持面に大きく影響すると考えられたため、調整が行われやすいことが推察されたが、試行ごとに先に障害物を乗り越える足が変わってしまうと条件間での比較が難しくなることが考えられた。そこで本研究では先に障害物を乗り越える足を実験前に被験者に選択させ、実験中はすべての試行において同一の足で先に障害物を乗り越えるように指示することとした。そこで実験に先立ち、被験者が 1) 実験室内での歩行に慣れること、及び 2) より自然な状態で障害物を先に跨ぐ足を選択することの 2 点を目的とした練習試行を行った。練習試行では、本実験と同様にランダムに障害物を提示し、被験者がそれらを自然に乗り越えられるようになるまで繰り返した。障害物を先に跨ぐ足を選択に関しては、より自然な動作で障害物を乗り越えられる足を、練習を通して被験者本人に選択させ、その後実施した本実験ではすべての障害物を選択した足で先に乗り越えるように指示した。なお本研究ではたまたま全被験者が右足で先に障害物を跨ぐことを選択した。

本実験において被験者は毎試行、ランダムに提示される障害物 (方向: $+60^\circ \sim -60^\circ$, 高さ: 25mm~150mm) から後方に約 4 m 離れたスタート位置に待機し、実験者の音声による合図によって歩行を開始した。歩行開始後は適宜障害物を乗り越え、障害物から 3 m 離れたゴール地点まで歩行した。実験時は被験者にはできるだけ普段通り歩行するように教示したが、歩行中の歩行速度や歩幅、視線などに関しては特に規定せず、本人が歩きやすい歩容で歩行するように指示した。なお各試行において、明らかに他の試行とは異なるような歩容 (歩幅が合わないなどの理由で目視でもわかるほど歩容を変えて歩行する、誤って事前を選択した側ではない方の足で障害物を先に乗り越えてしまうなど) が見受けられた際にはその試行をやり直した。また、実験中被験者は裸足で歩行した。

2-5 統計解析

算出した各値より、各要因 (方向: $+60^\circ \sim -60^\circ$, 高さ: 25mm~150mm) について被験者内での分析を行った。各条件間の解析には障害物へのアプローチの方向を因子 A、障害物の高さを因子 B とした繰り返しのある二要因分散

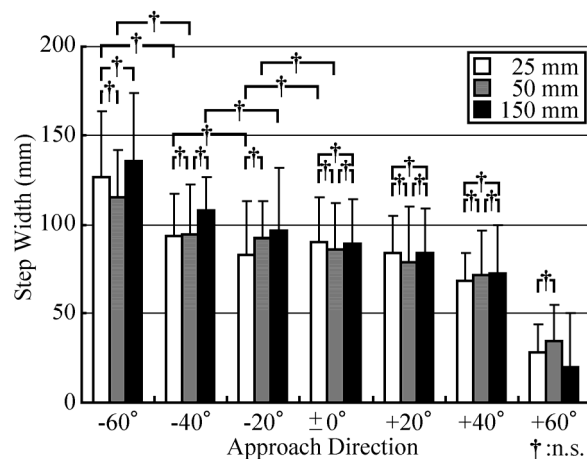


Fig. 1 Step Width

析を用い統計学的な比較を行った。なお主効果が有意であった際の多重比較は Sidak の手法を用いた。

3. 結果

3-1 つまづきに関する変数

まず各条件より得られた TC について繰り返しのある二元配置分散分析を実施した結果、障害物にアプローチする方向の主効果、及び障害物の高さの主効果が認められ、交互作用は認められなかった。分析の結果、TC については 1) 障害物に対してアプローチする方向は、ほとんどの場合効果が与えられない、2) 障害物の高さが 25mm の時と 50mm の時には高さの効果が認められないが、障害物の高さが 150mm になると高さの効果が認められ、150mm の障害物を乗り越える際には 25mm や 50mm の時に比べて TC が有意に大きくなるということがわかった。

3-2 支持面に関する変数

次に各条件より得られた SL について繰り返しのある二元配置分散分析を実施した結果、障害物にアプローチする方向の主効果、及び障害物の高さの主効果がそれぞれ認められたが、交互作用は認められなかった。分析の結果、SL に関しては 1) 障害物に対してプラス方向からアプローチするほど大きくなり、その傾向は障害物の高さが高いほど顕著である、2) 障害物の高さが 25mm の時と 50mm の時には高さの効果が認められないが、高さが 150mm になると高さの効果が認められ、150mm の障害物を乗り越える際には 25mm や 50mm の時に比べて SL が有意に大きくなるということがわかった。

各条件より得られた SW について繰り返しのある二元配置分散分析を実施した結果、障害物にアプローチする方向の主効果及び交互作用が認められたが、障害物の高さの主効果は認められなかった。交互作用が認められたため、それぞれの変数に対して下位検定を行ったところほとんどの組み合わせ間に有意差が認められた (通常通り有意差の認められた組み合わせに印をつけると図が見難くなるため、図 1 中には 5% 水準の有意差が認められなかった組み合わせを示す)。分析の結果、SW に関しては 1) アプローチする方向の効果がほとんどの条件で認められ、全体としてはプラス方向からアプローチするほど SW が小さくなるが、2) 高さの効果はあまり認められないことがわかった。特に $+60^\circ$ 条件の際には、正面からアプローチする際 ($\pm 0^\circ$ 条件) の半分以下になってしまうことが確認された。

最後に各条件より得られた WS について繰り返しのある二元配置分散分析を実施した結果、障害物にアプローチする方向、障害物の高さ及びそれらの交互作用のいずれにも

主効果は確認されなかった。このことから、WS に関しては障害物にアプローチする方向も障害物の高さも影響を与えないことが確認された。

4. 考察

4-1 つまづきに関する変数 (TC) への影響

本研究でつまづきに関する変数としては障害物跨ぎ越え動作時のつま先クリアランス (TC) を計測した。この変数が小さい跨ぎ越え動作は、障害物とつま先との間のマージンが小さいということであるため、よりつまづきやすい跨ぎ越え動作であると考えられる。実験の結果、アプローチする方向は跨ぎ越え動作に大きな影響を与えないことが確認された。またどの方向から障害物にアプローチした際にも、高さが 25mm の障害物と高さが 50mm の障害物をまたぎ越えた際には TC に有意差は認められず、高さが 150mm の障害物を跨ぎ越えた場合には 25mm や 50mm の障害物を跨ぎ越えた際との間に有意差が認められた。このことは、ヒトはある程度の高さの障害物までは障害物の高さにかかわらず一定のクリアランスを確保し、障害物の高さが一定値を超えるとより大きなクリアランスを確保している先行研究⁹⁾の結果と一致し、障害物に対してアプローチする方向が変わってもヒトは障害物の高さに応じて必要なクリアランスを確保できることが示唆された。このときヒトは障害物の高さに応じてつま先の高さも調整する必要があるが、障害物に対し正面からアプローチした際の先行研究によると、その調整は股関節、膝関節、足関節のすべてを用いていることが示されている¹⁰⁾。このことから本研究の被験者らも、より高い障害物を跨ぎ越える際には下肢三関節のすべてを用いてつま先を持ち上げ、クリアランスを確保していたと考えられる。

4.2 支持面に関する変数 (SL・SW) への影響

一方支持面に関する変数としては、本研究では障害物跨ぎ越え動作後の歩幅 (SL) と歩隔 (SW) の二つを計測した。これらの変数が小さい跨ぎ越え動作は、障害物を跨ぎ越えた後に形成される支持面が小さくなるため、不安定な跨ぎ越え動作であると考えられる。実験の結果 SL に関しては、障害物の高さに関係なくアプローチする角度がプラス方向に大きくなるほど ± 0 度条件と比べて有意に大きくなる傾向が確認され、アプローチする角度がマイナス方向に大きくなった場合には ± 0 度条件と比べて差は認められにくい傾向にあった。一方 SW に関しては、アプローチする方向や障害物の高さに関係なくほとんどの条件で ± 0 度条件との間に有意差が認められ、アプローチする角度がマイナス方向に大きくなるほど SW が大きくなり、プラス方向に大きくなるほど SW が小さくなることが確認された。特に $+60$ 度条件では ± 0 度条件と比べて SW が半分以下となっていた。また、先行研究で歩隔に影響を与えるとされていた歩行速度については、本研究では有意な差は認められなかった。以上のことから本研究で確認された結果は、本研究の計画段階で懸念した通り、跨いだ足の接地位置付近に障害物があるために、足と障害物の接触を避けようとしているために生じたと考えられる。これらのことから、プラス方向に大きい角度からアプローチした際には跨ぎ越え動作後に形成される支持面が、通常よりも縦長になっていることが考えられる。いくつかの先行研究^{11), 12)}では SW を調整して支持面を十分確保することが歩行中の安定性を確保するためのもっとも効果的な方法であると提案されており、また別の先行研究¹³⁾では不安定な状態ではちょっとした外乱でも転倒に至りやすくなると述べられている。これらのことから、プラス方向に大きい角

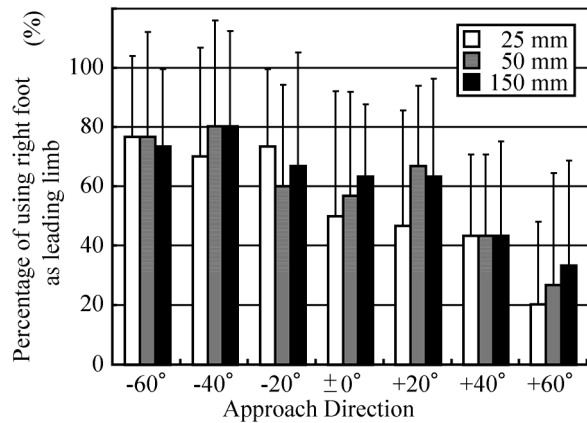


Fig. 2 Percentage of using right-leg as leading-limb

度からアプローチした際の跨ぎ越え動作は、 ± 0 度条件の跨ぎ越え動作に比べて特に側方への安定性を欠いた動作であると考えられる。側方への転倒は他の方向への転倒に比べて、大腿骨頸部骨折につながりやすいことが先行研究によって示されている⁴⁾。本実験では、提示された障害物に実際につまづいたり、ふらついたりして転倒に至った被験者は存在しなかったが、以上のことから今回確認されたような SL が短く SW が小さい跨ぎ越え動作で生じる転倒は、 ± 0 度条件で生じる転倒よりも大きな怪我に繋がりやすい可能性が示唆された。

4.3 実際の跨ぎ越え動作

以上のように障害物に対してアプローチする方向は、支持面の確保といった観点から回避動作に大きく影響することが確認された。しかし本実験では障害物にアプローチする方向を設定するため、被験者に本実験前に先に障害物を跨ぎ越える足を指定させ、その足ですべての障害物を先に跨ぎ越えるように指示した。そのため日常生活においては今回確認されたような跨ぎ越え動作は行わない可能性も考えられた。そこで本研究では、障害物を跨ぎ越える足を特に指定せず、様々な方向から障害物にアプローチした際にどちらの足で障害物を跨ぎ越えるかのみに着目した追実験を続けて実施した。追実験の被験者は本実験と同様若年健康者 10 名とし、本実験と同じ障害物 21 通り (方向: 7 種、高さ: 3 種) を 3 試行ずつ提示した。被験者らには提示された障害物をより自然な動作で跨ぎ越えるように指示し、その際先に跨ぎ越えた足 (右もしくは左) を記録した。記録した結果から、被験者が右足で先に障害物を跨ぎ越えた割合を図 2 に示す。この図では右足で先に障害物を跨いだ割合を示したため、 0 度条件に対し反時計回りの方向に障害物を回転させた条件がそれぞれ $+20$ 度、 $+40$ 度、 $+60$ 度の条件として示され、時計回りの方向に回転させた条件がそれぞれ -20 度、 -40 度、 -60 度の条件として示されている。実験の結果、右足で先に障害物を跨ぎ越える割合は、アプローチする角度がプラス方向に大きくなるにつれて減少し、逆にマイナス方向に大きくなるにつれて増加する傾向が確認された。このことからヒトは障害物にアプローチする方向に応じて、より大きな支持面、特に SW が確保される方の足で障害物を跨ぐよう歩容を調整していることが考えられる。しかしどの方向からアプローチする場合も、毎回必ず大きな SW を確保しやすい方の足で先に障害物を跨ぎ越えているわけではなく、本研究においてもっとも角度の大きかった条件である ± 60 度のどちらの条件でも、2 割程度の確率でより大きな支持面が確保されない方の足で障害物

を先に跨ぎ越えることが確認された。以上のことから、本実験で確認されたような、『支持面の適切な確保といった観点から不安定な跨ぎ越え動作』は、被験者が自然な回避動作を行った際にも生じることが確認され、日常生活で障害物に遭遇した際にもこのような回避動作をとっている可能性があることが示唆された。

5. 考察

本研究ではこれまでの障害物回避動作に関する研究では検討されてこなかった障害物に対してアプローチする方向に着目し、様々な方向から障害物にアプローチした際の跨ぎ越え動作を、転倒の要因として挙げられている『つまずき』と『支持面が確保されないことによるバランスの崩れ』の観点から評価した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) つまずきの観点からは、障害物にアプローチする方向は跨ぎ越え動作に特別な影響を与えない。
- 2) 適切な支持面を確保するといった観点からは、障害物にアプローチする方向は跨ぎ越え動作後の支持面の確保に大きく影響し、特にアプローチする角度がプラス方向に大きくなると、正面から障害物にアプローチした際よりも不安定な跨ぎ越え動作となる。
- 3) 上記のような不安定な跨ぎ越え動作は、実験のために設定した動作の統制を設定しない自然な状態でも一定の割合で生じる。

以上のことから、これまで行われてきた障害物回避動作に関する研究では安全な跨ぎ越え動作に大きな支障を与えないと評価されてきた障害物でも、アプローチする方向と先に跨ぎ越える足の組み合わせによっては、その動作がよりバランスを崩しやすくなることが示唆された。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 特別研究員奨励費 “歩行動作中の足部位置知覚特性—知覚している足の位置と実際の足の位置との誤差の評価 (課題番号：21・10476)” の一部補助を受けて行われた。

参考文献

- (1) Tinetti ME, Speechley M, Ginter SF: Risk factors for falls among elderly persons living in the community, *N Engl J Med*, 319(26), 1701-1707, 1988.
- (2) 近藤敏, 宮前珠子, 堤文生: 在宅高齢者の転倒と転倒恐怖, *OT ジャーナル*, 33, 839-844, 1999.
- (3) Maki BE, Perry SD, Scovil CY, Peters AL, McKay SM, Lee TA, Corbeil P, Fernie GR, McIlroy WE: Interventions to promote more effective balance-recovery reactions in industrial settings: new perspectives on footwear and handrails, *Ind Health*, 46(1), 40-50, 2008.
- (4) Smeesters C, Hayes WC, McMahon TA: Disturbance type and gait speed affect fall direction and impact location, *J Biomech*, 34(3), 309-17, 2001.
- (5) Austin GP, Garrett GE, Bohannon RW: Kinematic analysis of obstacle clearance during locomotion, *Gait Posture*, 10, 109-120, 1999.
- (6) Patla AE, Rietdyk S: Visual Control of Limb Trajectory over Obstacles During Locomotion: Effect of Obstacle Height and Width, *Gait Posture*, 1, 45-60, 1993.
- (7) Krell J, Patla AE: The Influence of Multiple Obstacles in the Travel Path on Avoidance Strategy, *Gait*

Posture, 16, 15-19, 2002.

(8) Orendurff MS, Segal AD, Klute GK, Berge JS, Rohr ES, Kadel NJ: The effect of walking speed on center of mass displacement, *J of Rehab. Res. & Dev.* 41(6A), 829-834, 2004.

(9) Patla AE, Vickers JN: Where and When Do We Look as We Approach and Step Over an Obstacle in the Travel Path?, *Neuroreport*, 8(17), 3661-3665, 1997.

(10) Patla AE, Prentice SD: The role of active forces and intersegmental dynamics in the control of limb trajectory over obstacles during locomotion in humans, *Exp Brain Res*, 106, 499-504, 1995.

(11) Bauby CE, Kuo AD: Active control of lateral balance in human walking, *J Biomech*, 33, 1433-40, 2000.

(12) MacKinnon CD, Winter DA: Control of whole body balance in the frontal plane during human walking, *J Biomech*, 26, 633-44, 1993.

(13) Catherine R. Lowrey · Ashley Watson · Lori Ann Vallis: Age-related changes in avoidance strategies when negotiating single and multiple obstacles, *Exp Brain Res*, 182, 289- 299, 2007.