

進入方向が障害物またぎ越え動作に与える影響

Effects of Approaching Direction to the Obstacle Avoidance Movements

○ 原島健走 (早稲田大学) 泉川浩 (早稲田大学)

小林吉之 (産業総合技術研究所) 藤本浩志 (早稲田大学)

Takeyuki Harashima, Waseda University

Hiroshi Izumikawa, Waseda University

Yoshiyuki Kobayashi, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

Hiroshi Fujimoto, Waseda University

Abstract: Present study focused on the effect of approaching directions for stepping over an obstacle. Ten young adults and elderly were asked to head towards an obstacle from seven directions (-60, -40, -20, 0, +20, +40, and +60 degrees), and step over it. In each trial, one of the three obstacles with different heights (25mm, 50mm, and 150mm) were placed. Kinematics while the participants step over the obstacles were recorded using 3-D motion capturing system, and were compared using the following parameters among the conditions: step length and step width. The results revealed that the approaching direction to the obstacles does not critically affect the obstacle avoidance movement in regards to tripping, but may critically affect the movements in regards to loss-of-balance.

Key Words: Falling, Obstacle Avoidance Movement, Measurement

1. はじめに

転倒は、すべての年代の人にとって減少させたい歩行中の事故である。そのため転倒が生じるメカニズムの解明と、それに基づく転倒しにくい工夫が必要とされている。

そこで転倒が生じやすい状況を実験的に再現し、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^{(1)・(3)}。そのような手法の一つに障害物のまたぎ越え動作に着目した研究がある。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、被験者は障害物の正面からまっすぐに進入しまたぎ越える際の動作しか評価されてこなかった。しかし日常生活において我々は、正面からだけでなく、様々な方向から障害物に進入することができる。そこで本研究では、障害物に対し様々な方向から進入した際の障害物またぎ越え動作を、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。特に、これまで様々な研究が行われてきた障害物に対して正面から進入した際のまたぎ越え動作とそれ以外の方向から進入した際のまたぎ越え動作との比較に重点をおいた。本研究では、上記の目的を達成するためにまたぎ越え動作の一部に拘束条件を付加した「実験 1」をはじめに行い、「実験 1」で確認されたような特徴が自然なまたぎ越え動作時にも確認できるかを調べた「実験 2」を続けて行った。本稿では初めに「実験 1」について、続けて「実験 2」についてまとめる。

2. 実験 1

2-1 方法

本研究では、10名の若年者(平均年齢 21.9±SD 1.2 歳, 平均身長 173.8±SD 5.5cm, 平均体重 58.5±SD 7.8Kg), 10名の高齢者(平均年齢 70.3±SD 3.5 歳, 平均身長 163.6±SD 7.7cm, 平均体重 60.9±SD 8.7Kg)を対象に実験を行った。実験前に被験者には、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「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」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。

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、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進入した。これにより見かけ上障害物に対する進入方向を変えた。

本研究では障害物に進入する角度について、被験者が障害物の正面から進入する条件を 0°条件として設定し、そこから±20°, ±40°, ±60°の計 7 条件を設定した。正負の符号に関しては、障害物を先にまたぎ越える足によって角度の効果が異なることが考えられたため、被験者が先に障害物をまた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またぎ越える場合には、0°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°, +40°, +60°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°, -40°, -60°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またぎ越える場合は、0°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°, +40°, +60°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°, -40°, -60°の条件と設定することとした(図 1)。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 (縁石の高さ)の 3 条件を設定した。これは障害物の高さによって進入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。なお障害物の色は薄めの茶色であった。

上述の条件間で被験者のまた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

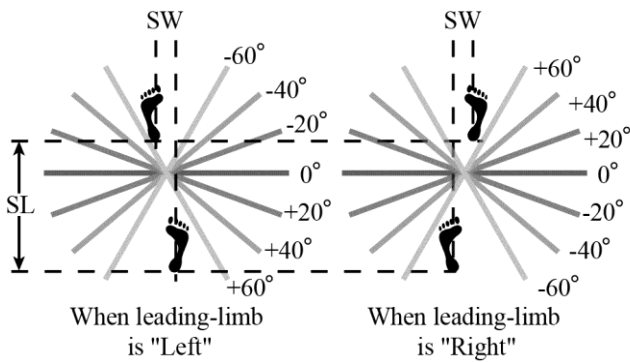


Fig. 1 The definition of approaching direction in this study.

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．なお記録した動作の空間座標は，被験者の進行方向に対して左右方向を x 軸，前後方向を y 軸，垂直方向を z 軸と定義した．

本研究における独立変数は，障害物に対して進入する方向 ($-60^{\circ}\sim+60^{\circ}$) と，高さ (25mm, 50mm, 150mm)，年齢 (若年者・高齢者) の 3 要因とした．また従属変数は，また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 3 つの変数を被験者内要因として比較した：変数 1) 『障害物を先にまたぎ越えた足つま先クリアランス (Toe Clearance : TC)』；変数 2) 『障害物をまたぎ越えた際の歩幅 (Step Length : SL)』；変数 3) 『障害物をまたぎ越えた際の歩隔 (Step Width : SW)』．これらの変数は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．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またぎ越えた後の支持面の確保に関する変数として計測した．本研究では，先に障害物をまたぎ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 SL と，左右方向の距離 (x 軸の距離) を SW と定義した．

障害物に正面から進入した際には，人はより安全にまたぎ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⁽⁴⁾．このことから障害物に進入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．特に先に障害物をまたぎ越える足は，上述の通りまたぎ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またぎ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またぎ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またぎ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またぎ越える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またぎ越えられるようになるまで繰り返した．障害物を先にまたぎ越える足に関する選択については，より

自然な動作で方向 0° の障害物をまたぎ越えられる足を，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またぎ越えるように指示した．

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 4m 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またぎ越え，障害物から 3m 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 (例えば，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，誤って事前選択した側ではない方の足で障害物を先にまたぎ越えてしまうなど)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．

算出した各値より，各要因 (方向： $-60^{\circ}\sim+60^{\circ}$ ，高さ：25mm～150mm，年齢：若年者・高齢者) について分析を行った．各条件間の解析には障害物への進入方向を因子 A，障害物の高さを因子 B，年齢を因子 C とした繰り返しのある三要因分散分析を用い統計学的な比較を行った．

2-2 結果及び考察

実験の結果を図 2～4 に示す．各図に共通して，横軸は障害物に進入した方向を，縦軸は各変数をそれぞれ示し，障害物の高さはグラフの濃淡で表わす．

まず，各条件より得られた TC について繰り返しのある三元配置分散分析を実施した結果，要因 A と要因 B，要因 C に関する交互作用 ($F_{(12,204)} = 2.505, p < .01$) が認められた．これらの多重比較の結果は，図 2 中に示す．分析の結果，TC に関しては 1) 若年者も高齢者も，ほとんどの場合，進入する方向は TC に影響しなかった，2) いくつかの先行研究の結果と同様に，高い障害物 (150mm) をまたぎ超えたとき，若年者は高齢者より大きな TC を維持していることがわかった．

次に，各条件より得られた SL について繰り返しのある三元配置分散分析を実施した結果，要因 A と要因 C に関する交互作用 ($F_{(6,108)} = 3.855$) 及び要因 B と要因 C に関する交互作用 ($F_{(2,36)} = 5.149$) がそれぞれ認められた．これらの多重比較の結果は，図 3 中に示す．分析の結果，1) 若年者は $+20^{\circ}\sim+60^{\circ}$ の条件では SL が長いという傾向があるが，2) そのような傾向は高齢者には見られないことが示された．また，3) 若年者は進入する方向に関わらず，障害物の高さが高くなるほど SL が長くなる．

最後に，各条件より得られた SW について繰り返しのある三元配置分散分析を実施した結果，因子 C の主効果 ($F_{(1,18)} = 5.004, p < .05$)，及び要因 A と要因 B に関する交互作用 ($F_{(12,216)} = 4.098, p < .01$) がそれぞれ認められた．これらの多重比較の結果は，図 4 中に示す．分析の結果，年齢に関係なく進入する方向が SW に大きな影響を与えることが明らかになった．特に $+40^{\circ}\sim+60^{\circ}$ の条件では，SW は 0° のときの半分以下であった．

SW は大きいほど，横方向の安定性が高くなることが知られている^{(5),(6)}．このように， $+20^{\circ}\sim+60^{\circ}$ の条件の障害物回避動作はバランスを崩しやすいため， 0° のときと比べて非常に危険な動作であると考えられる． $+20^{\circ}\sim+60^{\circ}$ の条件では，自然な歩行をしているときに足が地面に着く位置を遮るように障害物が置かれているため，このような結果になった

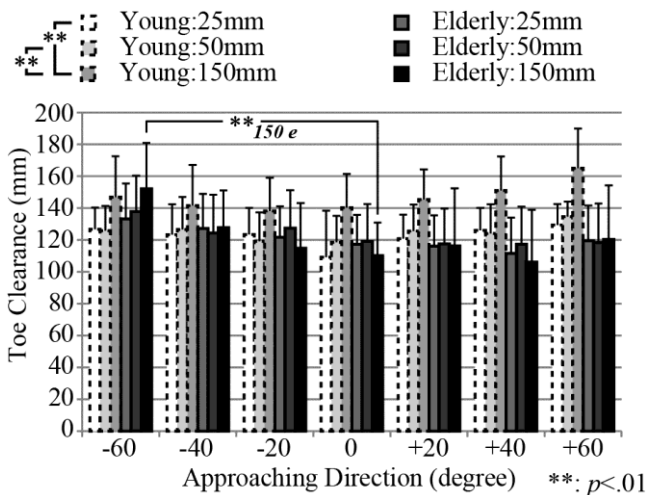


Fig. 2 Toe Clearance among the conditions

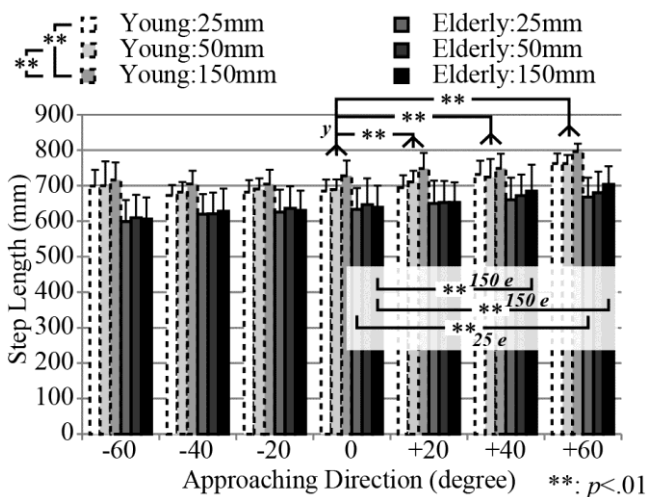


Fig. 3 Step Length among the conditions

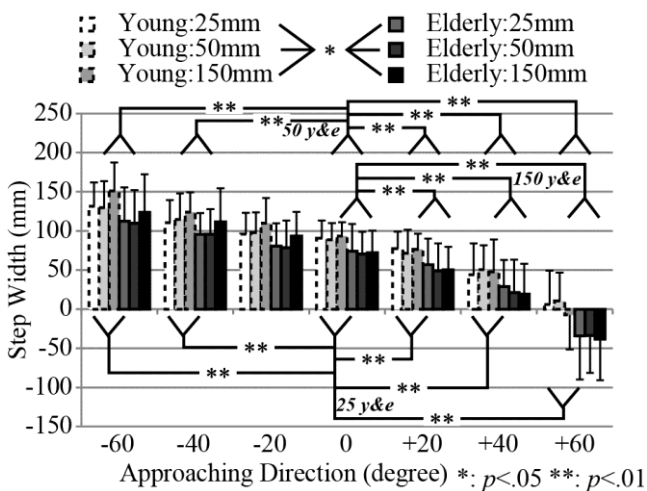


Fig. 4 Step Width among the conditions

可能性がある。

これらのことから、プラス方向に大きい角度から進入した際のまたぎ越え動作は、 0° 条件のまた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ことができる。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⁽²⁾。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 が小さいまたぎ越え動作で生じる転倒は、 0° 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。

3. 実験 2 実際のまたぎ越え動作

3-1 目的

以上のように障害物に対して進入する方向は、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。しかし実験 1 では障害物に進入する方向を設定するため、被験者に実験前に先に障害物をまたぎ越える足を指定させ、その足ですべての障害物を先にまた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また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、障害物をまたぎ越える足を特に指定せず、様々な方向から障害物に進入した際にどちらの足で障害物をまたぎ越えるかのみに着目した実験 2 を続けて実施した。

3-2 方法

実験 2 の被験者は若年健常者 10 名、高齢者 6 名とし、実験 1 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またぎ越えるように指示し、その際にまたぎ越えた足（右もしくは左）を記録した。

3-3 結果

記録した結果から、被験者が右足で先に障害物をまたぎ越えた割合を図 5 に示す。この図では右足で先に障害物をまたいだ割合を示したため、 0° 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 $+20^\circ$ 、 $+40^\circ$ 、 $+60^\circ$ 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° 、 -40° 、 -60° 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またぎ越える割合は、進入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。

3-4 考察

このことから人は障害物に進入する方向に応じて、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また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進入する場合も、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また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 $\pm 60^\circ$ 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またぎ越えることが確認された。以上のことから、実験 1 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またぎ越え動作』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。

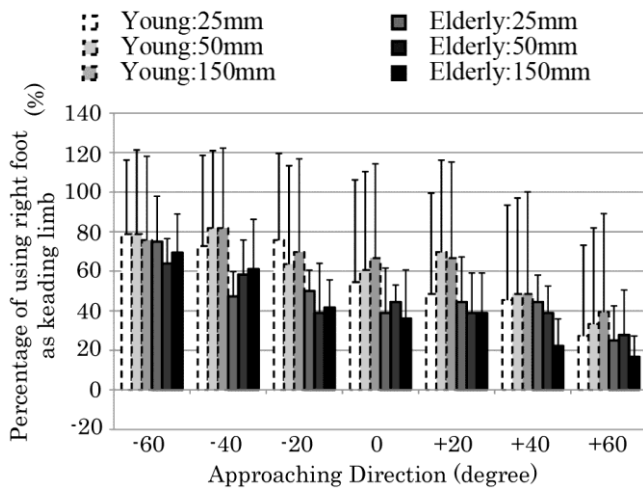


Fig. 5 Percentage of using right foot as leading limb

4. 今後の課題

本研究ではこれまでの研究ではまったく着目されてこなかった『障害物に対して進入する方向』が、障害物回避動作に与える影響を客観的・定量的に評価した。その結果、これまでの研究では障害物によって大きな影響を受けないとされてきた若年者でも、障害物に進入する方向によってはより不安定なまたぎ越え動作となることが示され、更に日常生活でもそのような動作が生じる可能性が確認された。このことから、我々は本研究を踏まえた上での今後の課題として、1) 障害物回避動作の再評価、2) より詳細な転倒原因の調査、及び3) 得られた知見に基づく学際的な対策の検討、の3つの課題を提案したい。

まず1) について改めて評価する必要があるのは、本研究で確認された通りこれまでの障害物回避動作に関する研究では大きな影響は受けないと報告されてきた対象や障害物でも、進入する方向などによっては回避動作に大きな影響を受ける可能性が考えられるためである。本研究では最も基本的なデータとして若年健康者を対象とし、十分に集中した状態で実験を行ったが、動作時の注意力も大きく影響するとされていることから、今後は歩行動作に困難を持つ者や様々な意識下での実験も行っていく必要があると考えられる。2) が必要な理由は、やはりこれまでの研究で見落とされていた点に基づいた実験的研究に大きな影響を与えていたためである。本研究室では本研究以前にも、それまでの調査で電源ケーブルや紐などが転倒に至った障害物として報告されていたことに着目し、前額面上で傾いた障害物の回避動作に関する研究を実施し、傾いた障害物をまたぎ越えるとよりつまずきやすくなることを確認した⁷⁾。この研究も、それまでの障害物回避動作に関する研究が地面と平行な障害物のみを提示してきたことに着目して実施したものであるため、本研究やこの研究のように転倒が生じる原因については、まだまだ見落とししている要因があることが考えられ、そのような要因を明らかにすることでより効果的な対策に繋がると考えている。同様に、未だその定義について議論の残っている利き足についても、転倒との関わりの観点から追求していく必要がある。最後に3) について検討が必要な理由は、本研究で得られたような知見に基づく対策としては上述の通り『人に対する介

入』と『環境に対する介入』の2種が考えられるが、そのいずれの場合も様々な関連分野の専門家と共に対策を検討しなければ効果的な対策が実現できないと懸念されるためである。これは例えば人に対して介入を行う場合、医師や理学療法士、社会福祉士など医療・福祉従事者とも共同で検討を行うことで、手法や提供場所、財源など、介入の内容を総合的に検討できるためである。同様のことは環境に対する介入を考える際にも言えるため、今後は上記のような観点から人の動作の評価を進め、具体的な対策を検討していきたいと考えている。

5. 結論

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進入する方向に着目し、様々な方向から障害物に進入した際のまたぎ越え動作を、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、障害物に進入する方向はまた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、障害物に進入する方向はまたぎ越え動作後の支持面の確保に大きく影響し、特に進入する角度がプラス方向に大きくなると、正面から障害物に進入した際よりも不安定なまたぎ越え動作となる。
- 3) 上記のような不安定なまたぎ越え動作は、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また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、進入する方向と先にまた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。

参考文献

- (1) 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.
- (2) Smeesters C, Hayes WC, McMahon TA: Disturbance type and gait speed affect fall direction and impact location, *J Biomech*, 34(3), 309-17, 2001.
- (3) Austin GP, Garrett GE, Bohannon RW: Kinematic analysis of obstacle clearance during locomotion, *Gait Posture*, 10, 109-120, 1999.
- (4) 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.
- (5) Bauby CE, Kuo AD: Active control of lateral balance in human walking, *J Biomech*, 33, 1433-40, 2000.
- (6) MacKinnon CD, Winter DA: Control of whole body balance in the frontal plane during human walking, *J Biomech*, 26, 633-44, 1993.
- (7) 小林吉之, 嶺也守寛, 藤本浩志: 傾いた障害物を跨いで越える際の歩容に関する研究, *バイオメカニズム学会誌* 30(2), 85-92, 2006.