

縦断勾配が車いす走行に与える影響に関する研究

横山 哲¹・清水 浩志郎²・木村 一裕³

¹ 正会員 博(工) 北海道開発コンサルタント(株) 交通施設部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目)

² フェロー 工博 秋田大学教授 工学資源学部 土木環境工学科 (〒010-8504 秋田市手形学園町1-1)

³ 正会員 博(工) 秋田大学助教授 工学資源学部 土木環境工学科 (〒010-8504 秋田市手形学園町1-1)

本研究は、高齢化する社会で歩行者等の移動上の安全性、快適性を論ずる前提として、歩行に着目し、歩行空間の設定上避け得ない勾配のうち、縦断勾配の上限値と勾配区間の限界長について示すものである。

本研究では、道路構造により通行上の障害を最も大きく受けると考えられる車いすを用い、これの走行挙動を評価指標とした。また、これまで直線的な登坂走行のみで実験されていたものに加え、より現実の歩行空間に近い条件とするため、走行路上に障害物を設定し、これを回避しつつ登坂するだけでなく、降坂走行も実験に加えた。この結果、車いす利用者が容易に走行可能な縦断勾配の上限値は5%であり、安定した走行が可能な縦断勾配区間の長さ(限界勾配長)は、5%勾配区間で25mであることを明らかとした。

Key Words : pedestrian areas, wheelchair, gradient, people with disability, sidewalk

1. はじめに

日本の人口構成のうち、65歳以上人口(高齢人口)が25%以上を占める超高齢社会の到来が21世紀初頭であると予想されている。高齢化の進展は、福祉的な視点からは、要介護者の増加と介助者の減少を、経済的な視点からは労働人口の相対的減少を意味し、社会活動、経済活動など、地域の活力に与える影響は非常に大きいと考えられる。そのため高齢化する地域の活力を維持し、より快適な生活をするために、高齢者も障害を持つ人も社会活動に参加可能、誰もが自立的社会生活可能なノーマライゼーション社会の実現が望まれている。

本論は、移動に制約のある人々の移動上の安全性、快適性を論ずる前提として、移動の基本である歩行に着目し、歩行空間の設定上避け得ない勾配について評価しているものである。すなわち、歩行上の大きな障害となり得る縦断勾配の上限値と限界長について、歩行者の中で道路構造により通行上の障害を最も大きく受けると考えられる車いす利用者の車いす走行挙動を評価指標とし、現実の歩行空間に近い条件での登坂、降坂走行実験から検討した結果を報告するものである。

2. 既往研究の概要

障害者、高齢者の歩行環境に関する問題点は、既に多くの調査により指摘されている。歩行空間を形成する道路の構造に関しては、歩道の通行幅、路上を占用している物件、勾配、段差、路面平滑性等が問題として指摘されている。道路を占用している物件については、各自治体や、道路周辺の住民の協力による排除が可能であり、また、歩道上の段差、路面平滑性は施工時の精度向上により、ある程度の対応が可能なものであると考えられる。これに対して勾配は、設計上の規格として存在し、問題を解決するためには設計上の規格を定量的な評価に基づき改める必要がある。

路面の勾配は、路面上の排水を目的とする横断勾配と、道路が地形に沿って設計、整備されることから避け得ない縦断勾配の2種類に分類される。

横断勾配は、車いすあるいは乳母車などが通行する全区間に影響を与え、これが大きな場合には車いすなどが車道側に流れ、危険な状況を誘発することも考えられる。一方、道路の縦断勾配は、自動車の走行状況に基づき道路構造令により規定されているが、歩行空間に関する規定はない。縦断勾配区間内で車いす利用者が、停止、休息することは困難であ

り、かつ危険である。とりわけ下り勾配は、車いす走行時の速度などの制御が不安定となり危険な状況となる可能性がある。

これら勾配のうち、横断勾配については横山ら¹⁾が、車いすの走行挙動を画像解析し通行が容易である横断勾配は、2.0%が上限となることを示している。

一方、縦断勾配については佐渡山ら²⁾、元田ら³⁾などの研究がある。佐渡山らは、車いすによる登坂に着目し、15mの試験走行区間を実際の車いす利用者が全力走行して得られた試験走行区間の登坂に要する時間、速度、筋電位等の分析結果から縦断勾配の限界値として8.5%を示した。これが現状のスロープ、斜路勾配基準値である1/12(8.3%)勾配の一つの拠り所となっている。元田らは、一般の道路空間内で歩道条件を分類し、各条件下での障害者および、健常者による車いす走行状況の観察結果から、実際の歩道空間上の問題点と歩道を設計する上で、望ましいと考えられる歩道の幅員、歩道勾配のあり方について歩道上の全般的な問題点を取りまとめ、具体的な数値基準の必要性、歩道整備の方向を示しているが、各種勾配の限界等の数値基準等は示していない。

これら縦断勾配に関する既往の研究成果は、車いす利用者が重力に対抗して登坂走行を行ない得るか否かを問題とし、登坂可能な限界的勾配角を示しているのみである。しかし、車いす利用者が安全かつ容易に歩行空間を通行可能とするためには、これら縦断勾配区間ににおける登坂のみではなく、自重による加速度に対抗せざるをえない降坂走行、さらに、登坂時に走行可能な延長についても検討が必要であると考えられる。既往研究では、試験走行区間が短いために、走行可能な距離との関係については知見が示されていない。このため、これら既往研究に基づき整備された勾配区間が問題箇所として指摘されるなど、実際の歩行状況、利用状況との乖離がある。

3. 本研究の概要

(1) 研究の内容

本研究の研究内容を表-1に示している。既往のいずれの研究も直線的な走行のみを実験の対象としており、限界勾配や勾配長の判定方法は、明確ではない。また、勾配と車いすの構造、自重等の力学的解析と車いす利用者の身体機能の対比から勾配区間ににおける車いす利用者の走行可能性を示すことはある程度可能と考えられるが、車いす利用者が安全な走行を実現する上からは、これら力学的な解析だけではなく、速度選択に対する意識、駆動状況、車いす操作能力などを総合的に反映したモデルを構築し、安全な走

表-1 研究概要

項目	内容
検討課題	限界勾配、勾配長
測定項目	走行速度、走行位置、車いす進行角等
走行方法	登坂、降坂

行が可能であることを判断する必要があり、モデル構築を行なう上で多くの問題がある。

本研究では、既往研究で言及されていない歩道縦断勾配区間での車いすの降坂走行、登坂可能な勾配延長、さらには、障害物をよけ得るか否かなど、現実の歩行空間で生じる車いすの走行挙動に基づき歩道縦断勾配と縦断勾配区間延長の上限値を走行実験結果から示すことを目的とした。なお走行実験にあたっては、現実の歩行空間の状況を反映させるため、適当な縦断勾配と距離を持つ実際の歩道を用いた。また、走行区間長は既往研究では15m程度であるが、本研究では、街区、住区の大きさから50m走行を基本とした。車いすの走行挙動はVTRにより撮影し、画像解析により数値化した。

(2) 本研究の特徴

本研究では、縦断勾配の上限、走行可能な距離について明らかにするため、これまで用いられてきた速度の変化状況に加え、歩道幅員内の走行位置変化、車いすの進行角(振れ角)等多面的な分析を行い、これらを総合的に判断して検討する。また、これまで考慮されていなかった降坂(下り)走行についても観測分析を行うところに特徴がある。

4. 実験概要

(1) 被験者の設定

被験者について、車いす利用者の身体能力は、障害の内容、障害の部位により、車いすマラソンに出場するような車いす操作能力、駆動力も高く頑健な者から、車いす操作がほとんどできず、常に介助が必要な者まで非常にばらつきが大きいことが知られており、本研究において、どのような身体機能をもった車いす利用者を想定するかは、重要な論点の一つであるといえる。すなわち、車いす操作能力が高く、駆動力も大きい利用者を想定した場合には、実験結果から導出された限界勾配や勾配長では、多くの車いす利用者にとって通行不能となる。また、これとは逆に、車いす操作能力、駆動力が極端に低い場合には、介助者との外出が多い実際の外出行動から見て現実的でないばかりでなく、あまりに厳しい要求水準のために、道路整備上の対応が不可能とな

るケースの増大が予想される。本研究では、現状の道路環境で日常的に自力で車いすを利用している人々を想定する。このような人々が日常的に車いすを利用するため必要な身体機能は、自力で車いすの駆動輪を回し走行できること、すなわち十分な駆動力を発揮し得ること。さらに、車いす左右の駆動輪に回転差を生じさせ進行方向の設定が可能であること、すなわち十分な車いす操作能力があることである。これら能力のうち駆動力は車いすを自力で利用する上で最も基本的な能力である。一方、車いす操作能力は、車いすの進行方向、速度を調整する能力であり、日常的に自力で車いすを利用している人々はリハビリテーションの過程で学習し習得している。これら能力を総合したものが車いす走行能力である。

本研究で想定する車いす利用者の身体機能は、ここに示した各能力のうち最も基本的な車いす駆動力の値が車いす利用者の平均的な人を被験者とすることとし、その他の能力については、車いす利用の初心者として位置付けることとした。これは、このような人々が問題なく通行可能であることは、より多くの人々にとって通行が容易な歩行空間であると考えたことによる。

車いす走行能力の比較にあたっては、車いす駆動力の比較とともに、佐渡山らの研究における車いす利用者の 50m 走行時間の分布状況から、その最頻値周辺の能力を持った人々の実験データから考察するものとした。なお、本研究で被験者を車いす利用者ではなく男子学生としたのは、車いす利用者のなかには、体温調節機能など、他の障害を有した人が少くないことなどから、車いす走行能力がこのような範囲にある車いす利用者のデータを多数得ることが困難なことによるものである。しかし、車いす駆動力や 50m 走行時間によるチェックにより、学生による実験データで十分な結果を得ることが可能と考える。

(2) 実験概要

実験走行路は、秋田市内の歩道から横断勾配 2%未満で、適当な縦断勾配をもちかつ、幅員 2.0m 以上の走行路幅を確保可能な直線区間を選定した。

被験者は、直線登坂実験 9 名、回避登坂実験 10 名（いずれも男子学生）である。これら被験者に重複はない。この被験者の妥当性を検討するため走行実験に先立ち、佐渡山らの研究結果を参考として、被験者毎の車いすによる 50m 全力走行時間と駆動力を計測した。走行実験は、表-2 に示す勾配区間で登坂、降坂の両方向で直線的走行と障害物回避走行（以下回避走行）を実施した。回避走行時の路上障害物配置は、図-1 に示すように走行路上 10m 毎に幅、奥行きとも 1m の障害物を互い違いに設置し、走行軌跡が必ず左右

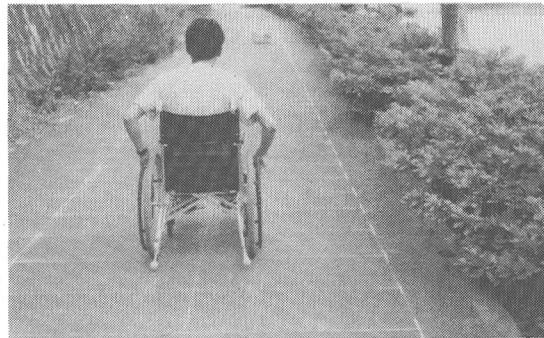


写真-1 走行路設定、車いす準備状況

表-2 実験実施勾配、走行区間長および実験環境

縦断勾配	4.7%	5.2%	6.1%	7.6%	8.5%
直線走行	○	○	○	○	○
回避走行	○	○	○	○	—
走行区間	50m	50m	50m	30m	30m
歩道幅員	3.5m	3.5m	2.5m	4.5m	4.5m
舗装種別	アスファルト				
横断勾配	1.5%未満				
補修痕等	なし（クラックなし）				
沿道環境	郊外部、家屋連担なし、交差点なし				

表中○印は、登降坂走行実験実施、一印は、実施せず。

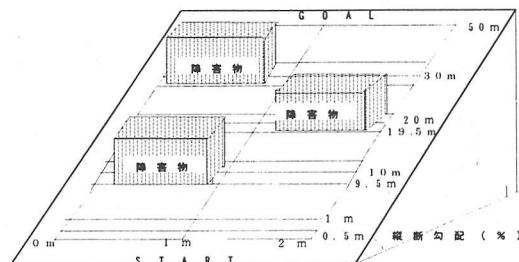


図-1 回避走行実験時障害物配置概念図

に振れるようにした。なお、9%を超える下り勾配区間では制動による車いすの駆動輪の滑りが発生し、安全な車いす制御ができないことが事前の安全確認走行で判明したことから、8.5%勾配区間を試験走行の上限とした。また、7.6、8.5%勾配区間延長が 30m と他に比べ短いのは、これを超える調査区間が実際の道路では存在しなかったことによる。走行時の被験者に対する指示は、「通常歩行速度と思う速度の維持」を共通の条件とし、直線走行時には走行路中心線上を走行すること、回避走行時には障害物と十分な距離を取り、かつ走行路から逸脱しないこととした。また、走行回数は被験者の疲労状況を考慮し登坂、降坂各 1 回とした。

(3) 実験記録および解析手法

本実験では VTR カメラにより走行状況を記録し、こ

の画像から走行状況を数値化する方法を採用した。VTR撮影画像から座標を読み取るために、路面上へのグリッド(0.5m×1.0m)記入と、基準目標物として車いすにピンポン球の取り付けを行った(写真-1)。撮影は、走行路が延長50.0m、幅員2.0mと極めて細長いことから車いすを追跡するように移動撮影とした。この時、先に示した車いすの目標物、路面上のグリッド、走行路の両側の外側線が画面上に表示されるとともに走行路幅が画面の85%以上を占めるようにした。さらに、直線走行時には画面内に被験者の両腕の動きも画面内に捕捉し、駆動状況を明らかとすることとした。なお、制動挙動については画面上では手のひらの動きを判断できないことから調査の対象外とした。また、回避走行時には、腕の動きが体の影となり腕の動きを把握できることもあることから車いすの挙動のみを把握することとした。

解析にあたっては、撮影画像をパソコン上に駒毎に表示し、走行路両側の外側線位置と車いすに設定した目標物の位置を左右別に0.5秒毎に数値化し、車いすに設定した目標物2点の座標値から重心位置、重心の速度、進行方向の算出を行なった。基礎集計時には進行距離0.5m毎の変化量に変換している。解析時のパソコン画面解像度は全画面表示で縦240ドット、横320ドットであり、解析時には、概ね1.0cm以下の精度で位置変化の把握が可能となる。一方、時間は撮影駒数が家庭用VTRでは、1秒間に30駒であり駒間の時差は1/30秒、0.5秒間隔とは15駒毎の数値化を意味する。

直線走行時の腕の動きは、駆動輪をつかみ、放すまでの時間を1回の駆動時間として、左右別に駒数から把握することとした。

(4) 被験者の妥当性の検討

学生を被験者とすることの妥当性を検証するため、縦断勾配0.15%とほぼ平坦な大学構内の道路(幅員8.0m)で車いすによる50m走と駆動力試験を実施した。構内道路の路面状況は、アスファルト舗装、維持補修痕なし、横断勾配1.0%未満である。また、駆動力試験はバネ秤を静止状態から反動をつけずに車いすで牽引し計測した。

学生による50m走の結果と佐渡山ら²⁾による障害者走行結果を比較すると図-2に示すように、被験者となる学生の走行時間は、障害者の最も多く分布するところに位置している。一方、学生の駆動力は、40~50kgf(392.4~490.5N)の間にあり、一般に車いすを日常的に利用する上で必要とされる最少駆動力10kgf(98.1N)⁴⁾のおよそ4倍の力を発揮しており、日常的に車いすを利用する上の能力は十分確保されていると考えられる。この駆動能力の位置付けに

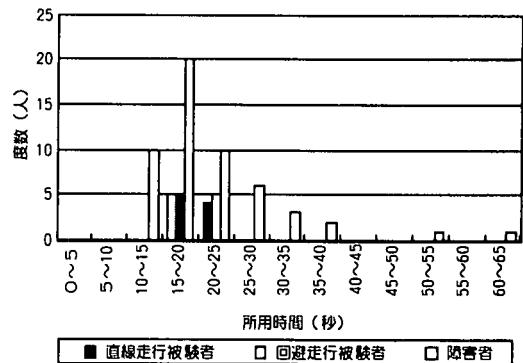


図-2 車いす50m走行時間分布図

表-3 縦断勾配により生じる勾配方向分力 (kgf(N))

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	8.5
勾配を下ろうとする力	3.4 (33.4)	3.7 (36.3)	4.4 (43.2)	5.5 (54.0)	6.1 (59.8)

については、現状では比較するデータが十分ではない。しかし、一般に車いすマラソン等の競技に参加する車いす利用者の上半身の力は、健常者の3~4倍であるとされることから、被験者の学生は、実用的に車いすを利用している障害者の中で少なくとも駆動力は標準的な身体機能を有する階層であると考えられる。本研究では、このような被験者による車いす走行実験結果から、歩道の縦断勾配や勾配長の限界値を検討する。

(5) 勾配による車いす自走可能性に関する検討

車いすを日常的に利用するための駆動力は10kgf(98.1N)以上必要と言われているが、平坦かつ滑らかな室内的床面で歩行速度程度の走行を維持するのみであれば駆動力は10kgf(98.1N)の1/3である約3.3kgf(32.4N)程度で十分であると言われている。勾配区間で車いす本体と被験者の体重を合計した自重により生じる勾配を下ろうとする力が、この値を越える時、降坂走行中の車いすは駆動によらず走行を維持するか、より加速することとなる。一方、登坂走行中の車いすについては、走行を維持するためにより大きな駆動力が必要とされ、場合によっては後退を始める可能性がある。

本実験の被験者の平均体重は62kg(608.2N)、実験に使用した車いすの自重は10kg(98.1N)であった。各勾配に応じた勾配を下ろうとする力は表-3に示すように、全ての勾配で3.3kgf(32.4N)を超え、走行路の路面状態によっては勾配区間を下り方向に自走する可能性がある。この勾配を下ろうとする力から見ると、4.7%、5.2%勾配降坂走行では走行路面性状の違いから車いすが自走するか、しないかの境界領域と考えられ、6.1

表-4 直線登坂および降坂時平均速度 (m/sec)

縦断勾配 (%)	4.7	5.2	6.1	7.6	8.5	
登坂時	①標準偏差	0.14	0.10	0.15	0.13	0.17
	②平均速度	0.74	0.81	0.70	0.71	0.61
	変動係数①/②	0.19	0.12	0.21	0.18	0.28
降坂時	①標準偏差	0.17	0.22	0.21	0.21	0.20
	②平均速度	0.80	0.92	0.86	0.84	0.75
	変動係数①/②	0.21	0.24	0.24	0.25	0.27
走行区間長 (m)	50.0	50.0	50.0	30.0	30.0	

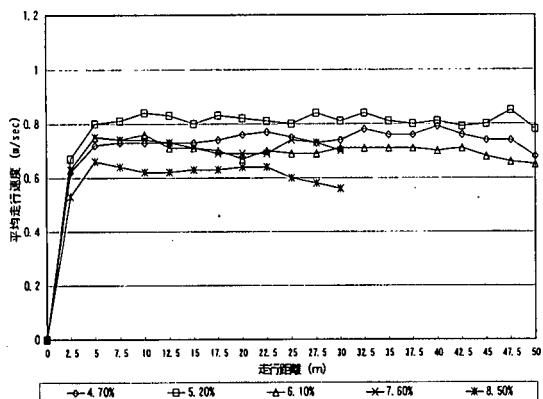


図-3 直線登坂時勾配別平均走行速度の変化

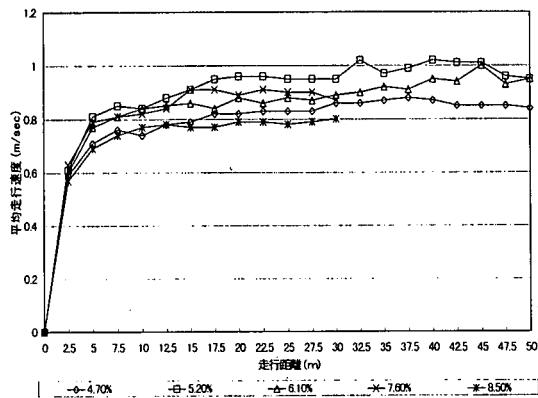


図-4 直線降坂時勾配別平均走行速度の変化

%以上の勾配では自走傾向が明確になる領域と考えられる。また、いずれの勾配でも被験者の駆動力はこの勾配を下ろうとする力に対し余裕があり、登坂が可能であることがわかる。

5. 直線走行における車いす走行挙動

(1) 走行速度

表-4には、登坂走行および降坂時の各勾配における速度の平均値と標準偏差を示している。

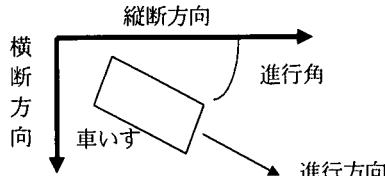


図-5 進行角の定義

ここに示した値は、各被験者の勾配毎の基礎集計結果から2.5m毎の瞬間速度を抽出し、速度が安定する起點から5m以降の全区間を対象として算出したものである。登坂走行時の平均走行速度は、平坦部における健常者の平均的な歩行速度(0.8~1.1m/sec)の下限に近い値を示している。一方、降坂時には登坂時に比べ平均速度は高くなるが、勾配間の速度の変化傾向は登坂時と同様の傾向を示す。

平均速度の標準偏差は、登坂時に比べ降坂時に大きい。変動係数(標準偏差/平均速度)は、8.5%勾配を除き降坂時に登坂時に比べ大きな値となっている。

走行中の速度変化は、登坂時には、4.7%，5.2%勾配を除き起點から5~10m地点で最大速度を示し、以降速度が低下する傾向にある(図-3参照)。一方、降坂時の速度は、勾配の増加、あるいは走行距離に応じて速度は上昇傾向にある(図-4参照)。

なお、勾配毎の平均走行速度の差に関する検定(有意水準5%)結果からは、登坂走行時の6.1%，7.6%勾配間でのみ有意差がなかった。これは、これ以外の勾配間での平均速度の変化状況はそれぞれ独立したものと考えられ、車いすの登坂走行にあたっては勾配が大きくなるにつれ、一定速度を維持することが困難となるといえる。一方、降坂時については4.7%勾配と8.5%勾配以外の勾配では、それぞれ隣り合う勾配値での走行速度に有意差はなかった。

(2) 車いす進行角と走行位置

縦断勾配区間の走行性については、希望走行位置の保持という観点から走行位置と、走行位置と密接な関係を持つ進行角について分析する。ここでは0.5秒毎の車いすに取り付けた左右の目標物(ピンポン球)位置の差から算出される進行角、重心位置の絶対値を2.5m毎に集計した結果を分析に用いた。

走行実験時に車いすの横滑り、後退といった走行挙動が生じなかつことから、進行角は図-5に示すように車いす進行方向と歩道縦断方向のなす角度と定義する。一方、走行位置は試験走行区間中心線と車いす重心の距離と定義する。

分析にあたっては、進行角、重心位置の変化状況を捉えやすいように累加値、累加曲線を用いることとし

表-5 直線登坂および降坂時平均走行位置(cm)

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	8.5	
登坂時	平均走行位置	1.76	2.55	2.76	1.21	1.82
	標準偏差	3.2	4.4	5.6	4.3	4.7
降坂時	平均走行位置	2.59	1.14	1.29	1.01	2.63
	標準偏差	3.0	4.3	4.8	5.3	4.0
走行区間長(m)	50.0	50.0	50.0	30.0	30.0	

注) 平均走行位置は、走行路中心からの離れを示す。

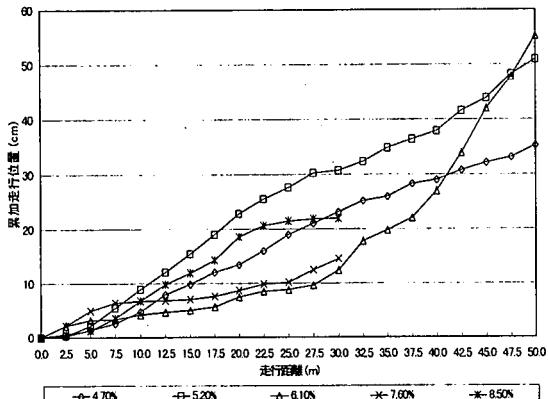


図-6 直線登坂時勾配別走行位置変化

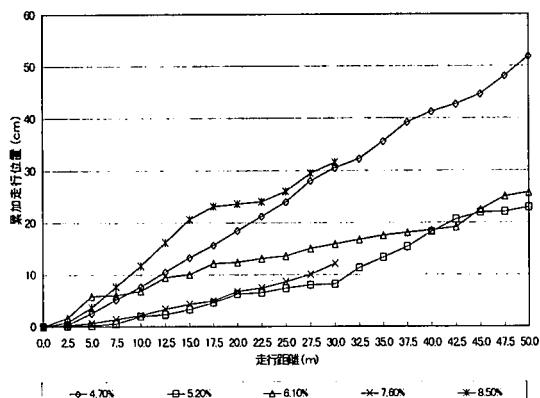


図-7 直線降坂時勾配別走行位置変化

た。なお、本走行実験は横断勾配が2.0%以下の区間で実施しているため横断勾配が走行位置に与える影響¹⁾は無視した。

表-5に登坂時の勾配別平均走行位置、標準偏差を示した。また、図-6、7に区間毎の走行位置の変化を示した。表-6には登坂時の勾配別平均進行角、標準偏差を示した。区間毎の進行角変化は、図-8、9に示した。進行角の変化は登坂時の8.5%勾配を除き、走行距離に応じてほぼ一定の増加傾向を示している。

進行角の増加傾向と走行位置の変化を合わせ見ると、6.1%勾配登坂時には起点から30m区間までの走行位置変位が他のいずれの勾配よりも少ないにもかかわらず、

表-6 直線登坂および降坂時平均進行角(度)

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	8.5	
登坂時	標準偏差	1.92	2.65	3.19	2.73	1.96
	平均進行角	0.79	0.53	1.69	0.49	0.65
降坂時	標準偏差	1.55	1.92	2.36	1.33	1.26
	平均進行角	0.39	0.74	1.40	0.28	0.29
走行区間長(m)	50.0	50.0	50.0	30.0	30.0	

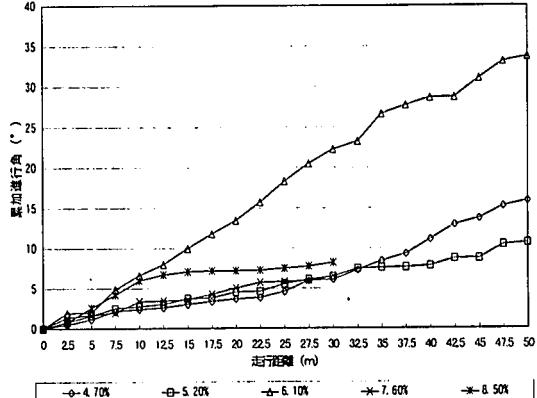


図-8 直線登坂時進行角変化

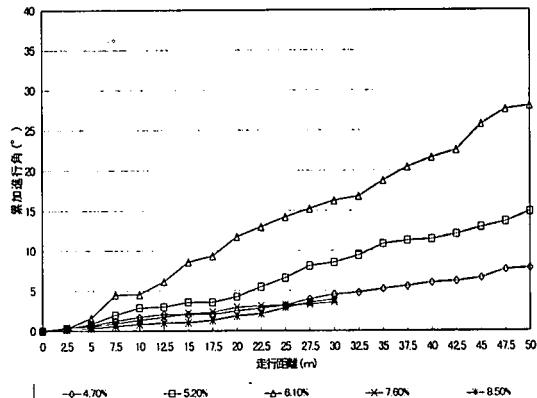


図-9 直線降坂時進行角変化

進行角の増加状況は走行区間内ではほぼ一定の増加傾向を示している。これは起点から30m程度までは車いすの進行方向の修正により走行路中心を走行可能であったが、これを超える区間での進行方向修正が困難となっていることを示しているものと考えられる。

また、8.5%勾配登坂時について見ると、進行角は起点から10m程度までの区間での増加が著しく、15~22.5m区間ではほぼ一定となり、以降の区間では微少な増加となっている。この時の走行位置は、7.5~22.5m区間で非常に大きな変化を示している。さらに、8.5%勾配降坂時には走行位置の変化が大きいにもかかわらず進行角の増加は少ない。

表-7 直線登坂時駆動状況

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	8.5
平均駆動時間(秒)	0.62	0.55	0.64	0.59	0.68
平均駆動時間の標準偏差	0.06	0.08	0.33	0.08	0.10
駆動時間比(%)	60.4	57.1	61.6	63.2	62.5

注: 平均駆動時間 = (右+左駆動時間) / (右+左駆動回数)

駆動時間比 = ((右+左駆動時間) / (所要走行時間*2)) * 100

これら点から、8.5%勾配の登坂時には勾配に対抗して直進を保つことは可能であるが、左右の駆動輪に回転差を生じさせ走行位置を変化させることが非常に困難であることを示しているものと考えられる。また、降坂時には勾配方向に車いすの走行方向は定められるものの、登坂時と同様に左右の駆動輪に回転差を生じさせ走行位置を変更することが困難となっているものと考えられる。

(3) 直線登坂走行時の駆動状況

走行を維持するための駆動状況について、表-7に示した登坂時駆動状況のうち駆動時間の走行時間に対する駆動時間の割合(駆動時間比)と平均駆動時間に着目してみると、5.2%勾配での値が小さいものの勾配が大きくなるにつれ一回あたりの駆動時間を長くするか、小刻みに駆動することとなっている。6.1%勾配の駆動時間の標準偏差は、他の勾配に比べ非常に大きく、駆動が一定しない状況を示している。このことが6.1%勾配登坂時の走行位置、進行角の変化が大きい理由と考えられる。また、8.5%勾配走行時には、駆動時間比も大きく、駆動時間も長く、さらに速度も低いことから被験者の車いす駆動は多くの困難が生じているものと推察される。

これら直線登坂、降坂試験の結果から考えると、少なくとも8.5%勾配区間では車いす利用者の安全かつ快適な通行は不可能と考えられる。このことから回避走行実験を、7.6%勾配以下で実施することとした。

6. 回避走行における車いす走行挙動

縦断勾配部における車いす走行では単に直線的な走行のみではなく、障害物の回避や、歩行者や自転車とのすれ違い、屈折や方向転換などで、縦断方向に対して一定の角度をもった車いす走行が必要となる。そこで以下では、障害物を回避する走行実験によって得られたデータから、縦断勾配部における横断方向の変位を含む車いす走行について分析した結果を報告する。

表-8 回避登坂および降坂走行時平均速度(cm/sec)

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	
登坂時	① 標準偏差	0.20	0.15	0.18	0.14
	② 平均速度	0.84	0.84	0.78	0.75
	変動係数①/②	0.24	0.18	0.23	0.19
降坂時	① 標準偏差	0.17	0.25	0.24	0.23
	② 平均速度	0.94	1.07	1.05	0.94
	変動係数①/②	0.18	0.23	0.23	0.23
走行区間長(m)	50.0	50.0	50.0	30.0	

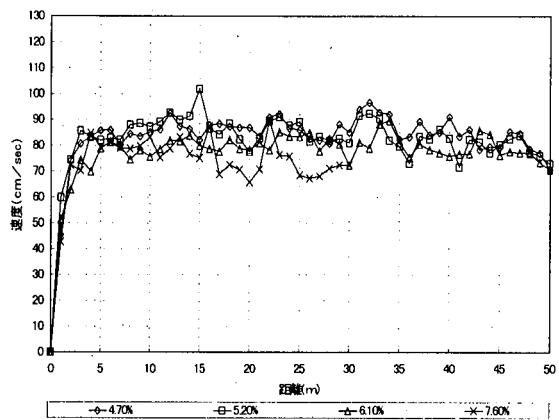


図-10 回避登坂時勾配別平均走行速度の変化

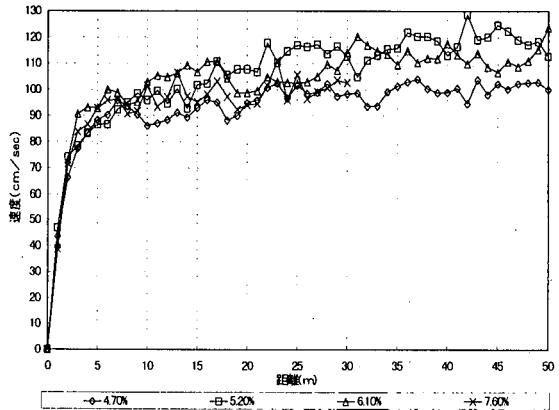


図-11 回避降坂時勾配別平均走行速度の変化

(1) 走行速度

表-8に、回避登坂走行および降坂走行時の角勾配における速度の平均値と標準偏差を示している。ここに示した値は、各被験者の勾配毎の基礎集計結果から1.0m毎の瞬間速度を抽出し、速度が安定する起点から5m以降の全区間を対象として算出したものである。

回避登坂走行時の平均速度は、平坦部における健常者の平均的な歩行速度の下限に近い値を示し、勾配が大きくなるにつれ低下する。一方、回避降坂時の平均

表-9 回避登坂および降坂時平均走行位置 (cm)

縦断勾配(%)			4.7	5.2	6.1	7.6	
登坂時	8~11	接近距離	42.5	48.3	43.7	42.0	
		標準偏差	8.1	6.8	7.3	10.7	
	18~21	接近距離	42.2	35.3	34.1	34.1	
		標準偏差	6.8	6.1	9.3	10.8	
	28~31	接近距離	41.8	42.7	43.5	—	
		標準偏差	10.8	11.8	9.2	—	
	38~41	接近距離	42.6	39.3	32.1	—	
		標準偏差	7.5	7.5	9.3	—	
平均 値			標準偏差	8.3	8.0	8.8	
降坂時			標準偏差	10.8			
降坂時	8~11	接近距離	47.6	43.7	43.6	43.5	
		標準偏差	4.9	7.5	4.5	5.7	
	18~21	接近距離	46.2	47.8	48.9	44.4	
		標準偏差	7.4	8.2	5.2	8.8	
	28~31	接近距離	46.7	44.8	42.9	—	
		標準偏差	4.4	5.0	8.1	—	
	38~41	接近距離	45.1	48.7	41.7	—	
		標準偏差	4.9	7.2	4.7	—	
平均 値			標準偏差	5.4	7.0	5.6	
降坂時			標準偏差	7.2			

速度は登坂時に比べ速いものとなっている。勾配間の速度の傾向は、5.2%勾配以上で走行速度が低下する傾向は登坂走行と同じである。

平均走行速度の標準偏差は、4.7%勾配で回避登坂時に大きいものの、これ以外の勾配では回避降坂時に大きいものとなっている。変動係数は、回避登坂時4.7%勾配で最大となり、5.2%勾配で収束した後、勾配が大きくなるにつれ再度大きくなるが、降坂時には5.2%勾配以上で同じとなる。走行中の速度変化についてみると図-10に示すように、回避登坂時の速度変化は障害物回避行動を伴うことから、直線登坂走行時に比べ速度の変動がいずれの勾配でも大きく、特に、10m毎に設置した障害物付近で速度の低下が見られる。また、距離による速度低下はすべての勾配で発生している。

一方、回避降坂時の速度変化は、図-11に示すように直線降坂走行と同様、すべての勾配で速度の上昇が見られる。障害物付近の速度は回避登坂時と異なり、必ずしも低下せず速度が上昇している場合もある。

勾配毎の平均走行速度の差に関する検定(有意水準5%)結果は、回避登坂走行時の4.7%勾配と5.2%勾配、6.1%勾配と7.6%勾配で平均速度の変化状況には有意差がなく、変化の傾向は同じとなっている。一方、回避降坂時には5.2%勾配以上の勾配では有意差がない結果である。このことから、車いすの回避登坂走行にあたっては、5.2%勾配と6.1%勾配の間に、回避降坂時には4.7%勾配と5.2%勾配の間に走行速度を規定する要因があるものと考えられる。

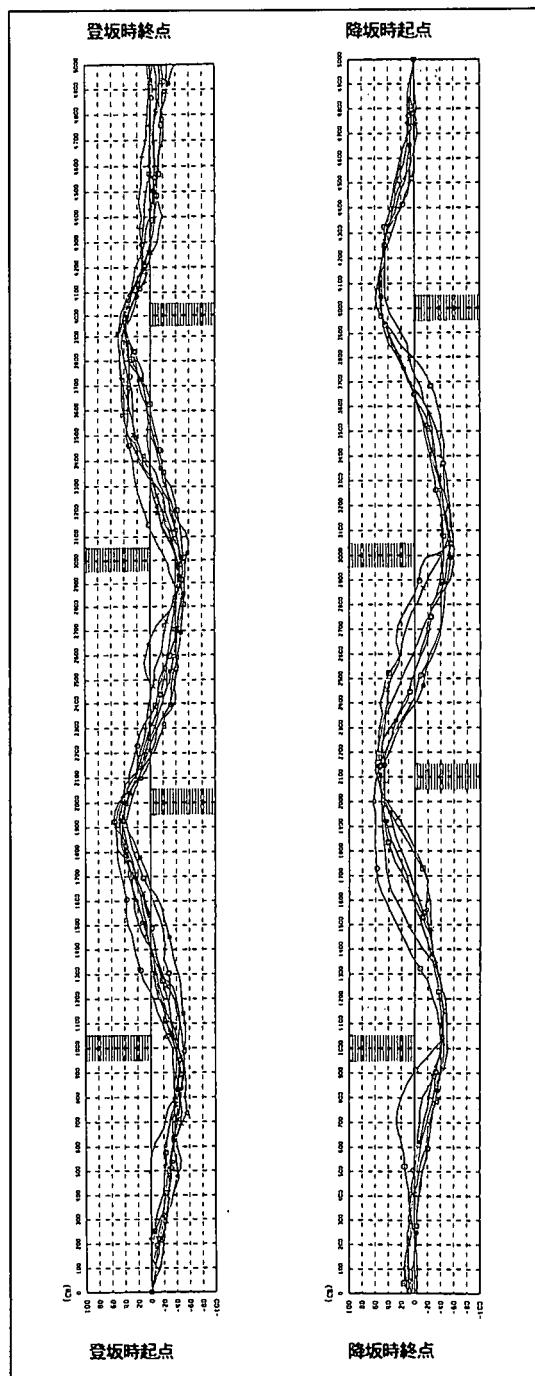


図-12 回避登坂および降坂時の走行軌跡 (6.1%勾配)

(2) 走行位置

走行位置は、障害物の前後各1m区間について車いすの重心位置により分析した。表-9から回避登坂走行時の車いすの平均走行位置は、4.7%勾配では障害物と車いす重心の距離(以後、接近距離)は41~43cmであり、車いす重心から車いす駆動輪外側面までの距

離が33cmであることから、この勾配では車いすと障害物の間に8~10cm程度のクリアランスを確保して走行していると考えられる。しかし、勾配の増加に伴い走行区間内での接近距離が一定しなくなり、6.1%勾配では接近距離の最小値が32.1cmと車いすと障害物のクリアランスが十分ではない状況も発生しており、6.1%を超える勾配では車いす利用者が障害物に接触するなど、通行が不可能となる場合もあると考えられる。

一方、回避降坂走行時にも、勾配の増加に伴う障害物との距離の減少傾向が見られるが、登坂時と異なりいずれの勾配でも接近距離は40cm以上となり、障害物と車いすのクリアランスは確保されている。

障害物回避時の走行位置の平均的な標準偏差は、登坂時4.7%~5.2%勾配では、約8cmとなっているが、6.1%勾配8.8cm; 7.6%勾配では10cmを超え、勾配が大きくなるにつれ走行位置のばらつきが大きくなる。一方、降坂時の平均的な標準偏差は5~7cmであり、登坂走行時と比較して安定した結果となっているように見える。しかし、勾配毎の重心走行軌跡(図-12に例として6.1%勾配登坂時を示す)で比較すると6.1%勾配以上で被験者間の走行軌跡のばらつき傾向が顕著となり、降坂時の車いす操作は、必ずしも容易ではないものと考えられる。

7. 縦断勾配の限界に関する考察

(1) 各測定項目に対するまとめ

本実験では、少なくとも対象とした勾配区間すべてを車いすで登坂あるいは降坂が可能であった。しかし、勾配の限界を論ずるにあたっては単に登坂あるいは降坂が可能なだけでなく、縦断勾配がない場合と同様な走行状況、すなわち車いす利用者の安全かつ快適な通行可能性についての検討が必要である。

車いす利用者の安全かつ快適な通行を確保する上からは、まず一般歩行者との動線の錯綜が少ないことが望まれる。このためには、一般歩行者との歩行速度の差および、走行中の速度変動が少なく、さらに進行方向の振れ、走行軌跡が平坦部を走行する場合と同様な範囲に收まることが望ましいといえ、この場合に走行が容易であると判断される。

表-10に、一般的な歩行者の歩行速度範囲、横断勾配が2%以下の平坦な区間を車いすにより走行した既存実験結果¹⁾に基づく速度変動の変動係数、進行角の標準偏差、道路構造令の歩道幅員設定の考え方に基く走行位置の振れなど、走行が容易と判断するための基準を示した。車いすの平均走行速度が一般的な歩行速度に重なる時、速度維持が容易であると判定する。また、速度の変動係数は、平坦な区間を走行する場合の変動

表-10 走行の容易さ判断基準

平均走行速度(m・秒)	0.8≤Vave.≤1.1
速度の変動係数	0.21以下
進行角の標準偏差(°)	2°以下
走行位置の振れ(cm)	10cm以下

表-11 直線登坂走行結果一覧

縦断勾配(%)		4.7	5.2	6.1	7.6	8.5
速度 (m/秒)	平均(V _{ave})	0.74	0.81	0.70	0.71	0.61
	標準偏差	0.14	0.10	0.15	0.13	0.17
速度の変動係数		0.19	0.13	0.21	0.18	0.27
平均進行角(°)		0.79	0.53	1.69	0.49	0.65
進行角の標準偏差(°)		1.92	2.65	3.19	2.73	1.96
平均走行位置(L _{ave})(cm)		1.76	2.55	2.76	1.21	1.82
走行位置標準偏差(σ _n)(cm)		3.2	4.4	5.6	4.3	4.7
走行位置の振れ(L _{ave} +2σ _n)(cm)		8.16	11.35	13.96	9.81	11.22

表-12 直線降坂走行結果一覧

縦断勾配(%)		4.7	5.2	6.1	7.6	8.5
速度 (m/秒)	平均(V _{ave})	0.80	0.92	0.86	0.84	0.75
	標準偏差	0.17	0.22	0.21	0.21	0.20
速度の変動係数		0.21	0.24	0.24	0.25	0.27
平均進行角(°)		0.39	0.74	1.40	0.28	0.29
進行角の標準偏差(°)		1.55	1.92	2.36	1.33	1.26
平均走行位置(L _{ave})(cm)		2.59	1.14	1.29	1.01	2.63
走行位置標準偏差(σ _n)(cm)		3.0	4.3	4.8	5.3	4.0
走行位置の振れ(L _{ave} +2σ _n)(cm)		8.59	9.74	10.89	11.61	10.63

表-13 直線登坂および降坂走行判定結果

縦断勾配(%)		4.7	5.2	6.1	7.6	8.5
走行速度	登坂	×	○	×	×	×
	降坂	○	○	○	○	×
速度の変動係数	登坂	○	○	○	○	×
	降坂	○	×	×	×	×
進行角	登坂	○	×	×	×	○
	降坂	○	○	×	○	○
振れ幅	登坂	○	×	×	○	×
	降坂	○	○	×	×	×

状況0.21以内の場合に走行が容易であると判断する。

車いすの進行角は、他の歩行者に車いす利用者の挙動を予測させ、錯綜を減少させる上から平均的な角度より振れの程度が重要であると考え、横断勾配がない場合でも生じる平均進行角の標準偏差2°を引用し、勾配区間走行時でもこの値以内の場合に走行が容易であると判断する。走行位置は平均走行位置に対し標準偏差を平均的に振れた幅と解釈し、平均走行位置の値に標準偏差の幅を和したものが、道路構造令に示される振れ幅10cm以内の場合通行が容易であると判断す

表-14 回避登坂走行結果一覧

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	
速度 (m/秒)	平均(V_{ave})	0.84	0.84	0.78	0.75
	標準偏差	0.20	0.15	0.18	0.14
速度の変動係数	0.24	0.18	0.23	0.19	
障害物との最小距離(cm)	41.8	39.3	32.1	34.1	

表-15 回避降坂走行結果一覧

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	
速度 (m/秒)	平均(V_{ave})	0.94	0.82	0.81	0.71
	標準偏差	0.17	0.25	0.24	0.23
速度の変動係数	0.18	0.23	0.23	0.23	
障害物との最小距離(cm)	45.1	43.7	41.7	43.5	

表-17 直線登坂時限界勾配長算出結果(m)

被験者	4.7%	5.2%	6.1%	7.6%	8.5%
A	39.0	29.1	34.1	11.9	3.0
B	38.2	22.5	23.5	11.9	5.9
C	41.8	24.2	34.9	8.4	13.8
D	29.5	10.9	15.0	12.0	9.4
E	34.1	36.0	25.4	13.9	7.9
F	11.6	49.0	29.9	17.5	3.3
G	26.1	14.6	19.5	16.1	8.6
H	28.0	43.3	43.0	21.8	6.2
I	30.6	30.6	33.2	7.1	8.0
平均値	31.0	28.9	28.7	13.4	7.34
標準偏差	8.5	11.8	8.2	4.3	3.11
限界勾配長	31.0	28.0	28.0	13.0	7.0

表-16 回避登坂および降坂走行判定結果

縦断勾配(%)	4.7	5.2	6.1	7.6	
走行速度	登坂	○	○	×	×
	降坂	○	○	○	×
速度の変動係数	登坂	×	○	×	○
	降坂	○	×	×	×
障害物との最小距離	登坂	○	○	×	×
	降坂	○	○	○	○

る。直登降坂実験結果を取りまとめたのが表-11, 12である。また、表-10の基準に基づき各項目毎に走行が容易であると判定した場合○、そうでない場合に×として判定を行った結果を表-13に示す。縦断勾配区間を単に直線的に登降坂する場合、少なくとも8.5%勾配では快適な走行は望めないことは、ここからも明らかである。しかし、直線走行の結果のみでは、6.1%あるいは7.6%勾配区間での走行の容易さについて判断はできない。

次に、回避走行結果についても、直線走行と同様の検討を行う。ここでも表-10の判断基準を用いるが、障害物を回避する部分については、車いす重心と障害物の距離が車いすの重心位置から車いす駆動輪外側までの距離33cm以下の場合には走行できないと判定した。また、回避走行時には進行角に関する分析結果がないことから割愛している。表-14, 15に回避走行実験結果を取りまとめたものを示す。また、表-10に基づき判定を行った結果を表-16に示している。

(2) 勾配値ならびに勾配長の設定

本研究では、縦断勾配部における車いすの走行性を判定する指標として、登坂については速度、速度の変動係数、進行角、振れ角を、また降坂については速度、速度の変動係数、障害物との最小距離を観測した。その結果、表-13, 16に示したように、各指標ごとに判定結果は異なったものとなっている。

ところで縦断勾配部における車いすの走行性は、こ

表-18 回避登坂時勾配長算出結果(m)

被験者	4.7%	5.2%	6.1%	7.6%
A	34.4	34.8	11.2	8.7
B	35.4	15.8	9.3	8.7
C	41.0	39.9	17.3	4.4
D	33.9	36.0	18.2	1.2
E	33.4	39.4	6.5	0.5
F	26.3	18.4	4.4	4.9
G	14.4	27.3	21.5	6.5
H	12.0	12.5	6.5	21.3
I	13.4	22.9	20.4	22.3
J	18.9	5.9	8.1	1.5
平均値	26.3	25.3	12.3	8.0
標準偏差	10.2	11.4	6.0	7.4
限界勾配長	26.0	25.0	12.0	8.0

これらの指標を個々に検討するのではなく、安定した速度の維持と、車いすの適正な位置ないしは姿勢の保持という視点から評価する必要があると考えられる。そこで本研究では、縦断勾配部における勾配値ならびに勾配長の設定において、走行方向および走行速度の維持ができなくなる地点を限界点とし、起点からこの点までの全被験者の平均走行距離を当該勾配における限界勾配長と定義し、この延長から勾配値、勾配長について考察を行うこととした。

限界点は、累加振れ角の変化点近傍で速度変化が大きく、さらにその近傍で最低速度を記録した点である。また、起点からこの点までの距離が限界勾配長となる。図-13に回避登坂時の限界勾配長算出例を示す。

なお、降坂走行については表-3にも示したように、今回対象としている勾配すべてで自走の可能性があり走行速度の上昇が見られる。この走行速度の維持にあたっては、被験者の危険認識と、被験者の握力に依存する制動力によって定まると考えられ、今回の実験からはいずれの項目も不明であることから限界勾配長については登坂走行によって判断することとした。

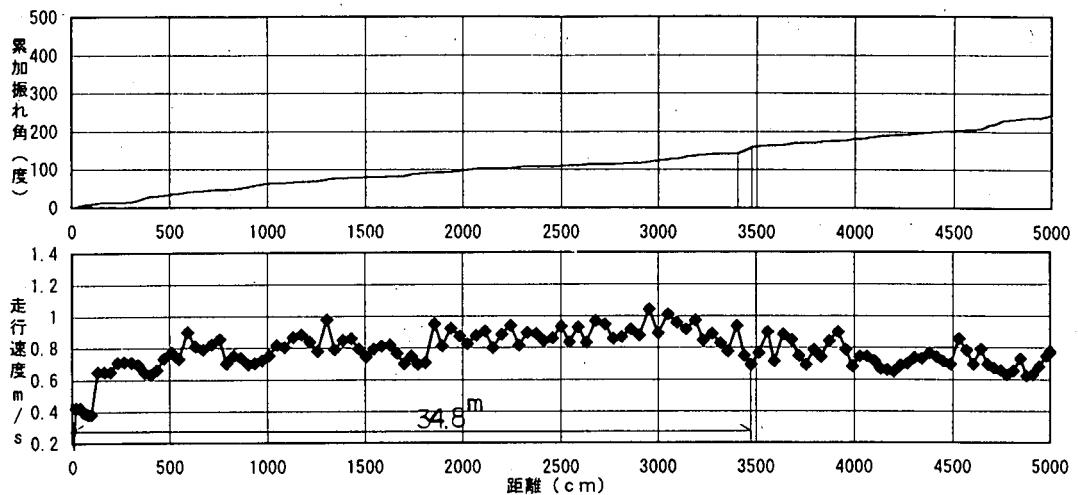


図-13 回避登坂時限界勾配長算出例 (5.2%, 被験者 A)

表-19 既存の勾配に関する規格、基準値一覧

法律等	勾配上限	制限長	備考
建築基準法 施行令	1/8(12.5%)	なし	
	1/12(8.3%)	10m	国際障害者マーク表示が可能な上限
ハートビル法 ¹⁾	1/12(8.3%)	9m	屋内、屋外の基礎的基本
	1/15(6.7%)	11.25m	屋外の誘導的基準
道路構造令 設計速度	50 km/ h (6.0%)	なし	特例 7%時 230m 以内 8%時 170m 以内 9%時 130m 以内
	40 km/ h (7.0%)	なし	特例 8%時 130m 以内 9%時 100m 以内 10%時 80m 以内
	30 km/ h (8.0%)	なし	
	20 km/ h (9.0%)	なし	
	立体横断施設技術基準	(12.0%)	なし 8.0%で運用されることが多い

*高齢者、身体障害者等が円滑に利用できる特定建築物の建築促進に関する法律

表-17 には直線登坂時の、表-18 には回避登坂走行時の各勾配毎の通行可能な勾配長算出結果を示した。これら結果を見ると、いずれの走行方法でも勾配の増加に応じて、限界勾配長が減少する傾向がある。

また、一般に直線走行に比べ回避走行時の限界勾配長が短くなっている、縦断勾配区間走行時の回避行動が、車いす走行に与える影響が非常に大きいことが明らかであり、限界勾配長は歩行空間の利用状況を考慮した回避登坂時の結果を用いることが望ましいといえ

る。回避登坂走行時と直線登坂走行時で限界勾配長に大きな差がないのは、5.2%勾配以下の場合であり、これは先に示した評価結果、車いす走行が容易である勾配は5.2%以下であることを間接的に示しているといえ、この点から、車いす利用者と歩行者が共存して容易な通行を可能とする歩道等の設計に用いる縦断勾配は5.0%が上限であると考えられる。また、8.5%勾配の限界勾配長は直線登坂実験結果のみであり7.0mと算出されている。しかし、6.1%勾配時の回避限界勾配長は直線限界勾配長の46%、7.6%勾配では61%と走行可能な距離は半減しており、8.5%勾配の限界勾配長は、直線登坂時の1/2である3.5m程度と考えるべきである。

ここで得られた結果を既存の規格、基準と比較すると表-19に示すようになる。なお、この表では歩道が車道の線形に沿って作られることから、各設計速度に応じた車道勾配の上限値についても示している。また、横断歩道橋などの立体横断施設に設定される斜路部に用いられる基準⁵⁾は、ここに示すように12.0%であるが、多くの場合8.0%が用いられ、歩車道すりつけ部にも適用されている。

本研究で得られた結果は、既定のいずれの規格、基準よりも緩やかな勾配となっており、多くの人々にとって通行がより容易となる規格、基準といえる。

8. あとがき

本研究では、車いす走行実験から車いすで容易に通行可能な縦断勾配の上限値5.0%と、各勾配区間を走行可能な距離(限界勾配長)を明らかにした。

ここで得られた結果は、車いす利用者としての妥

当性を評価した上で、健常な学生を被験者とする車いす走行実験結果に基づくものであるが、あくまでも上限値として取り扱うべきものである。

また、限界勾配長は、車いす利用者が容易に登坂が可能な長さについて縦断勾配の上限値にとらわれず示している。これはとくに降坂時の車いす走行を考慮し、安全な走行を行うために必要な空間を限界勾配長以内毎に設定することを意図している。

今後、本研究で明らかにした各限界値が道路等の設計、計画に有効活用されることが望まれる。

参考文献：

- 1) 中川 伸一, 栗山 清, 小笠原 章, 横山 哲:「人にやさしい道路を目指して」歩道横断勾配が車椅子の運動に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.775-786, 1995.8.
- 2) 佐渡山 亜兵, 佐野 吉雅, 谷井 克則, 荒井 宏: 車椅子登坂にたいする勾配の影響について, 人間工学, Vol.10, No.4, pp.131-137, 1974.
- 3) 元田 良孝, 西岡 南海男: 車椅子の走行特性と道路構造について, 交通工学, Vol.24, No.6, pp.88-111, 1989.
- 4) 大川 飼雄, 伊藤 利之, 田中 理, 飯島 浩: 車いす, 医学書院, 1994.4.1.
- 5) (社) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, 1979.1.

(1997. 10. 6 受付)

RESEARCH INTO THE EFFECT ON BEHAVIOR OF WHEELCHAIR BY SIDEWALK GRADIENTS

Tetsu YOKOYAMA, Koshirou SHIMIZU and Kazuhiro KIMURA

This research focuses on movement on foot and is based on the convenience and safety of pedestrians in an aging society. It especially concerns itself with dimensions of gradients in pedestrian areas. The research showed the upper limits on gradients at pedestrian areas and limits on the lengths of these inclines.

The results showed that the gradients at pedestrian areas which can be comfortably negotiated by wheelchair users should not exceed 5%, and that the maximum length of slopes in sectors with 5% gradients which would allow stable movement was 25m.