車いす使用者の身体的負担の定量化と走行環境に関する研究

Evaluation of Wheelchair User's Physical Load and Road Environment

橋詰　努　　北川博巳
HASHIZUME Tsutomu, KITAGAWA Hiroshi

キーワード：
移動、車いす、身体負荷、評価、酸素摂取量
Keywords:
Mobility, manual wheelchair, physical load, evaluation, oxygen uptake

Abstract:
The purpose of this study is to evaluate the physical load of the wheelchair users by the oxygen uptake values and the wheelchair driving force while they are propelling a wheelchair upward on a slope. Unimpaired adult subjects were asked to propel the wheelchair on the slope that was used for the emergency escape route. The profile of the slope was 8% gradient, 120m distance, and 7.6m height. The Oxygen Cost Index of the wheelchair users while propelling manual wheelchair upward on the slope indicated approximately 0.017 (litter/one meter) and it was about three times higher than that of by flat floor in the room (0.006 l/meter). The averaged wheelchair driving power while ascending the slope presented approximately 58W, and it was needed by about four times as large as flat floor (15W). We conclude that 8% gradient and 120m distance of the slope cause extremely high physical load for the wheelchair users even in the case of unimpaired persons. So, we should improve the slope of sidewalk to reduce the physical load of wheelchair users.

1　はじめに

歩道のスロープ（縦断勾配、横断勾配）は車いすにとって大きなバリアである。高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律（平成18年）による道路移動等円滑化基準では、「歩道等の縦断勾配は５％以下とする。やむを得ない場合においては８％以下とすることができる」と定められている。

この基準の根拠としては、既存研究と文献等から５％以下であれば車いす使用者が登坂可能であること、車いす使用者25名の実験結果（０、２、４、５、６、８％勾配、30m直線）では24名が８％登坂可能であったことによっている。しかし、勾配ごとの登坂距離、速度の関連は不明であり今後の課題とされている。また現在国内において歩道のバリアフリー化への取り組みが積極的に行われているが、効果の定量的な検証が課題となっている。

本研究ではスロープ走行時の車いす使用者の身体的負担を客観的に明らかにすることにより、スロープを含む歩道環境を評価する手法を提案し、バリアフリー度の評価やスロープのユニバーサルデザイン等に応用することを目的とする。

２　スロープ走行と身体的負担

スロープについては平成21年度の研究報告集[1)]において、避難スロープを上る時の身体的負担について報告した。

スロープ勾配と登坂距離、速度等の関連を評価するためには、勾配を適宜設定可能であり、かつある程度連続した距離の実験用スロープが必要である。スロープの距離については、昨年の実験結果より、８％勾配で120ｍの連続登坂が健常者の身体的限界に近いことより100ｍ程度が望ましいと思われる。

しかし、最大勾配８％で100mの連続したスロープを製作することは、実際には物理的制約等により困難である。

そこで、筆者は強化発泡スチロール製基盤の表面をベニヤ板で補強した構造の室内実験用スロープを製作した（図１）。実験用スロープは基盤の組み合わせにより５％と８％のスロープを構築できる。床面からスロープ頂上までの高低差はそれぞれ0.5m、0.8m、スロープ距離は10mである。

スロープ距離が短いため、10mを越える実験の場合には、被験者は頂上まで10mのスロープを上り、頂上に到達後、介助者が速やかに車いすをスロープ下まで戻す。その後被験者はスロープを上る動作を繰り返すことにより、所定の距離を上る実験方法を取り入れた。車いすで短距離のスロープ登坂を繰り返す実験手法により、連続したスロープ登坂の身体的負担を評価することが可能か否かについては、避難スロープデータとの比較により検証を行った。

避難スロープは体育館に付属する建築物であり、横断勾配がなく平坦に仕上げられているため、８％勾配のスロープの基礎実験には最適である。しかし、実際の道路のスロープにおいては、水捌けのための横断勾配や、施工の限界もしくは経年変化により路面の凹凸や波打ちが避けられない。本研究においては実際の道路環境における車いす使用者の身体的負担を評価することを目的とするため、平均縦断勾配約８％の道路のスロープにおいても実験を行った。

本報告書では、2.2節で室内実験用スロープを200m走行した時の５％と８％勾配の身体的負担ついて述べ、2.3節で８％勾配の避難スロープの結果を、そして2.4節で約８％勾配の道路のスロープの実験結果について述べる。そして、3.1節では室内実験用スロープ走行における５％と８％勾配の比較、3.2節では短距離の実験用スロープを往復した時の身体的負担と連続した避難スロープとの検証結果を、3.3節では避難スロープと道路のスロープの比較について言及する。また、3.4節では平坦路の身体的負担を基準とした場合の各スロープの負担を表す指標を、3.5節では運動負荷指標として一般に使用されているMETs（METs: Metabolic Equivalents、代謝当量）に変換した値について述べる。

2.1　計測装置

車いすを駆動するときにハンドリムに加わる力を計測するため、トルク変換器（共和電業製TP-10KMSA84）とロータリ・エンコーダ（小野測器製RP-8514L）を組み込んだ計測用車いすを使用した（図１）。車いすの座面高さは約46㎝、座幅は約37㎝、ハンドリム間距離60㎝、駆動輪直径約60㎝（呼び径24インチ）、重量約25kgである。

酸素摂取量は携帯型呼吸代謝測定装置VO2000（S＆ME社製）を用いて、10秒毎の平均酸素摂取量を計測した。酸素摂取量は各実験とも、走行実験の前後に５分間の安静時のデータを収集した。心拍計S625X（ポラール社製）により、心拍数は５秒毎に記録される。

図１　室内実験用スロープと実験状況
Fig.1　Experimental condition on slope

2.2　室内スロープ

2.2.1　実験手法

被験者は健常成人男性６名（平均年齢28歳±15.0S.D.、平均体重65kg±6.0、平均身長175㎝±5.4）である。

５％と８％の２種類のスロープ勾配について、各被験者はスロープを上る動作を20回繰り返し、計200mの走行を行い、その間の酸素摂取量、心拍数、車いす駆動トルクを計測した。

なお、今回の各スロープ実験では、車いすを漕ぐストローク数と速度は被験者の自由とした。

2.2.2　実験結果

各被験者について、スロープ上り部分のデータを抽出して補正した酸素摂取量、単位距離当たりの酸素摂取量を図２、３に示す。単位距離当たりの酸素摂取量を酸素摂取量代謝指標（O_2 cost index（litter/meter））と呼ぶ。また、心拍数、車いす駆動トルクからもとめた仕事量と仕事率を図４から図７に示す。

５％勾配の平均酸素摂取量代謝指標は0.0087l/meter、200m走行後の平均心拍数は133bpm、平均仕事量は11751J、平均仕事率は70.1Wであった。

８%勾配の酸素摂取量代謝指標は0.0150l/meter、200m走行後の心拍数は150bpm、仕事量は16908J、平均仕事率は70.8Wであった。

また、勾配５%と８%のスロープの酸素摂取量代謝指標の平均値の差には有意差がみられた（$p<0.01$）。同様に心拍数（$p<0.05$）、仕事量（$p<0.01$）についても平均値の差に有意差がみられた。

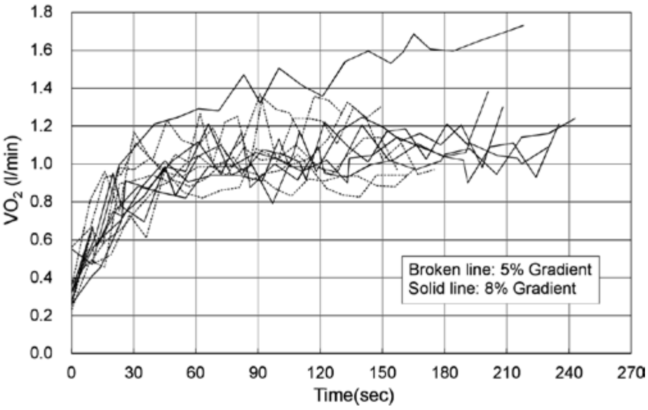


図２　酸素摂取量の変化（５%、８%）
Fig.2　Oxygen uptake（5%, 8%）

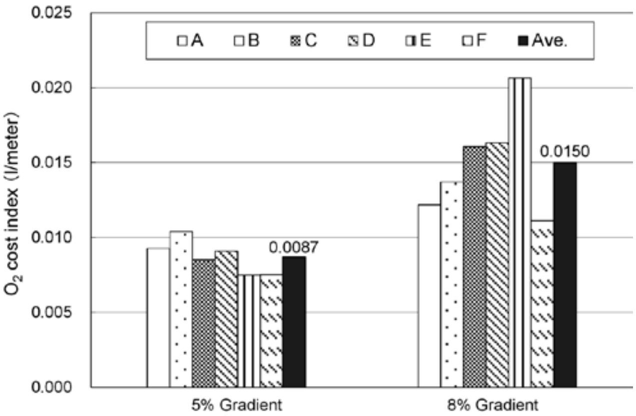


図３　酸素摂取量代謝指標（５%、８%）
Fig.3　O_2 cost index（5%, 8%）

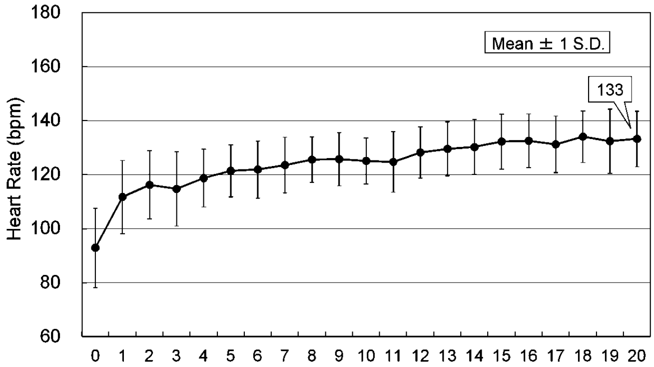


図４　心拍数の変化（5%）
Fig.4　Heart rate（5%）

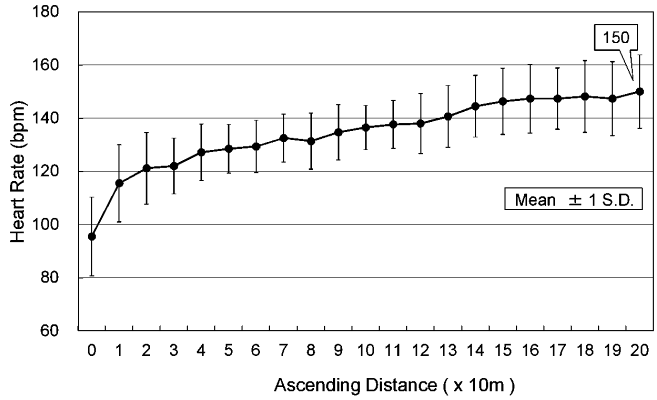


図５　心拍数の変化（8%）
Fig.5　Heart rate（8%）

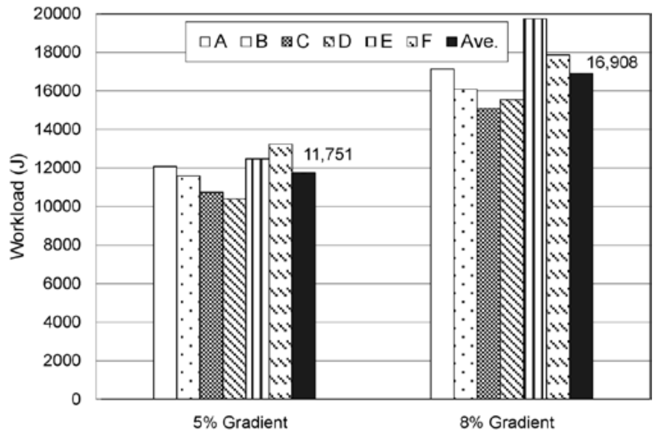


図６　仕事量（５%、８%）
Fig.6　Workload by driving torque（5%, 8%）

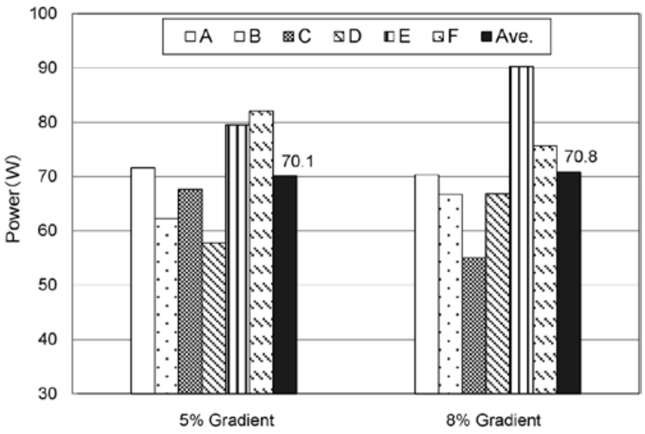


図７　仕事率（５%、８%）
Fig.7　Power by driving torque（5%, 8%）

2.3　避難スロープ

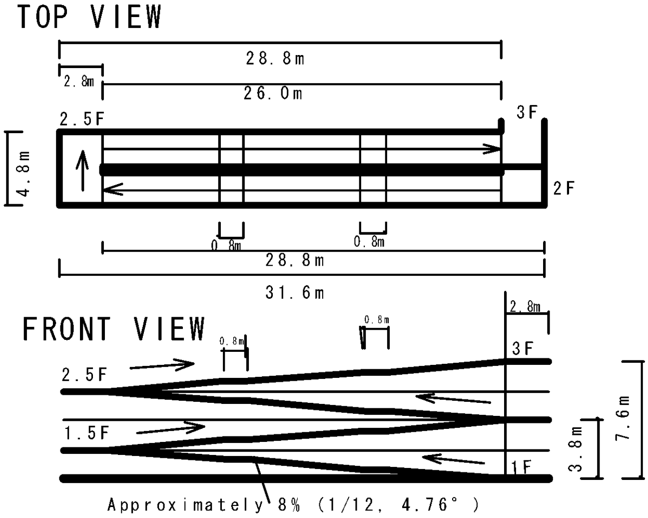
2.3.1　実験手法

避難スロープの勾配は８%、１階から３階までの高低差は約7.6m、走行距離は120mである。途中1.5階・２階・2.5階の折り返し地点は平坦な踊り場になっている。スロープの途中には0.8mの平坦区間が２ヶ所ある（図８）。

被験者は室内スロープ実験と同じ健常成人男性６名（平均年齢28歳±15.0S.D.、平均体重65kg±6.0、平均身長175cm±5.4）である。

走行実験は、１階から３階まで連続してスロープを上り、その間の酸素摂取量、心拍数、車いす駆動トルクを計測した。

(a)



(b)

図８　避難スロープの外観と形状
Fig.8　Overview image (a) and profill (b) of escape slope

2.3.2　実験結果

各被験者の酸素摂取量代謝指標、仕事量、仕事率を図９から図11に示す。

８%勾配の避難スロープでは、平均酸素摂取量代謝指標は0.0170l/meter、３階到達時の平均心拍数は156bpm、平均仕事量は8072J、平均仕事率は58.4Wであった。

なお、被験者Dの心拍データに不具合がみられたため、平均心拍数は残り５名のデータより求めた。

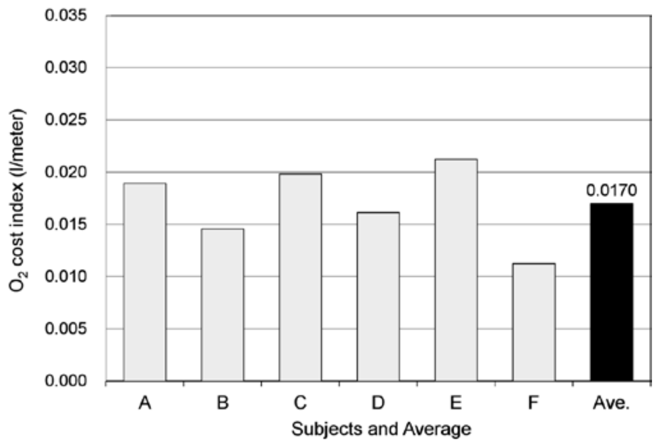


図９　酸素摂取量代謝指標（避難スロープ）
Fig.9　O_2 cost index（Escape slope）

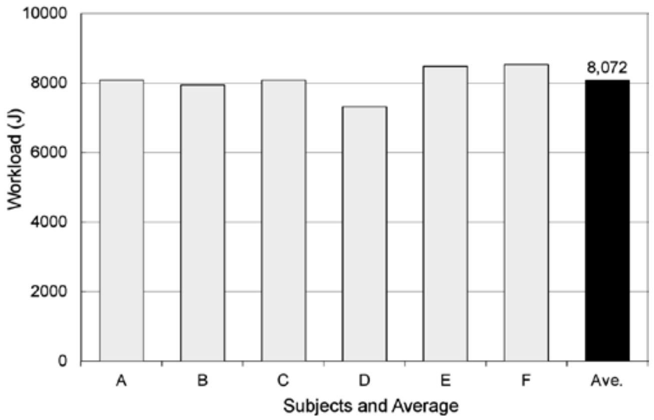


図10　仕事量（避難スロープ）
Fig.10　Workload（Escape slope）

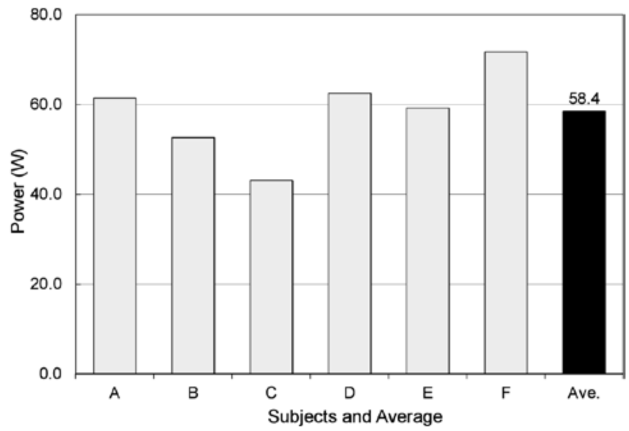


図11　仕事率（避難スロープ）
Fig.11　Power（Escape slope）

2.4　道路のスロープ

2.4.1　実験手法

図12に道路のスロープの外観と形状を示す。スロープの勾配は約８%、走行距離は105mである。

被験者は健常成人男性４名（平均年齢22歳±0.8、平均体重65.5kg±5.1、平均身長176.8cm±5.4）である。

走行実験は、スタート地点からゴール地点まで連続して道路のスロープを上り、その間の酸素摂取量、心拍数、車いす駆動トルクを計測した。

図12　道路スロープの外観と実験状況
Fig.12　Overview image of road slope

2.4.2　実験結果

各被験者の酸素摂取量代謝指標、仕事量、仕事率を図13から図15に示す。

８%勾配の道路のスロープでは、平均酸素摂取量代謝指標は0.0234l/meter、105m走行後の平均心拍数は156bpm、平均仕事量は8923J、平均仕事率は55.0Wであった。

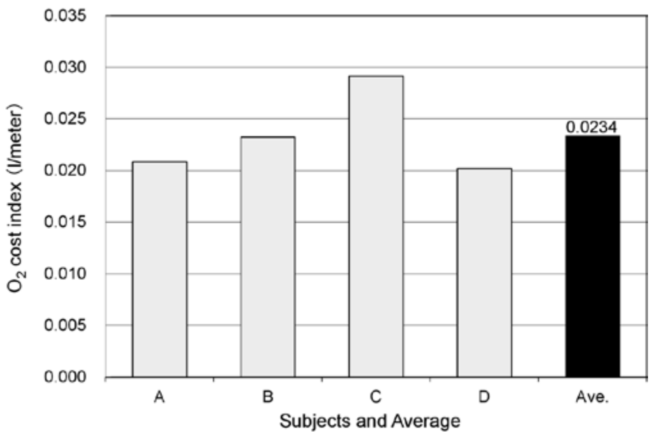


図13　酸素摂取量代謝指標（道路スロープ）
Fig.13　O_2 cost index（Road slope）

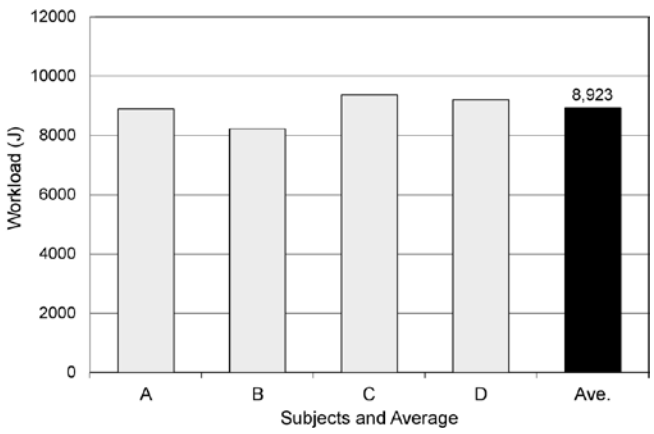


図14　仕事量（道路スロープ）
Fig.14　Workload（Road slope）

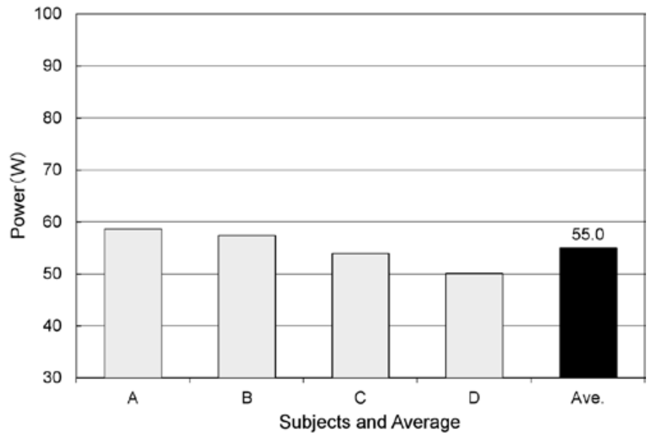


図15　仕事率（道路スロープ）
Fig.15　Power（Road slope）

３　考　察

3.1　実験用スロープ勾配の違いによる身体的負荷

室内スロープ走行実験において、５％勾配における数値を基準とすると、８％勾配は酸素摂取量代謝指標では約1.7倍、心拍数は約1.1倍、仕事量では約1.4倍の差があり、平均値の差に統計的有意差がみられた。また、主観的評価を表すボルグ指数の平均値は５％勾配では13.7（ややきつい、きつい）、８％勾配15.7（きつい、かなりきつい）であった。以上の結果より、８％勾配は５％勾配のスロープに比較して有意に身体的負担が大きいことが明らかになった。

一方、両者の仕事率の値はほぼ同じであった。仕事率の変化が小さいのは、スロープ下までに運ぶ間に疲労回復した腕が大きな力を再度次の10mの間に発揮できるためと考えられる。この繰り返しによって、被験者が出せる限界の腕力を５％、８％勾配のどちらでも発揮することが可能となり、その結果単位時間内に加える力（仕事率）が等しくなったものと考えられる。

3.2　実験用スロープ（短距離スロープ往復）と避難スロープ（連続スロープ）実験の検証

室内スロープ実験は物理的制約により、短距離を上り、介助により下ることを繰り返している。そこで、短距離往復の身体的負担が連続走行の場合と同等か否かについて、８％勾配室内スロープ（200m）と避難スロープ（120m）と比較・検証した。

表１に示すように、平均酸素摂取量代謝指標の値は８％勾配室内スロープは0.0150l/meter、避難スロープは0.0170l/meterであり、ｔ検定では両者の平均値の差に有意差は認められなかった（$p=0.18>0.05$）。

従って、身体的負荷の指標と考えられる酸素摂取量代謝指標の評価を行う場合には、10mの短距離スロープを繰り返し往復することにより、連続したスロープと同等の評価を行うことが可能と思われる。

表１　８％勾配スロープの比較
Table 1　Summary data on each 8% slope

	Experimental Slope (N=6)	Escape Slope (N=6)	Road Slope (N=4)
O2 cost Index(l/meter)	0.0150	0.0170	0.0233
METs	4.4	5.2	5.4
HR(bpm)	150	156	156
Workload(J)	16908	8072	8923
Work(W)	70.8	58.4	55.0

3.3　避難スロープと道路スロープの比較

８％勾配避難スロープ（0.0170l/meter）を基準とすると、道路スロープ（0.0233l/meter）における酸素摂取量代謝指標の両者の差は1.4倍であり、平均値の差に有意差がみられた（$p<0.05$）ことより、実際の道路を走行するときの身体的負担がより大きいことが確認された（図16）。

道路のスロープは105mであり、避難スロープと比較してわずかに短いため、酸素摂取量代謝指標の値は小さくなると考えられる。両者に有意な差が生じた原因としては、道路スロープでは踊り場や平坦区間がなくスロープを連続して上っていること、縦断勾配に加えて横断勾配や路面の波打ちの影響が考えられる。

図18に示すように、車いす駆動トルクから算出したスロープを上る物理的負担を表す仕事量も、避難スロープの8072Jに対して、道路スロープは8923Jで道路スロープが避難スロープの1.1倍物理的負担が

大きく、両者の平均値の差に有意差がみられた($p<0.05$)。

一方、走行終了時の平均心拍数（図17)、平均仕事率（図19）については、両者の平均値の差に有意差は見られなかった。心拍数は両者とも156bpm、主観的運動強度を示すボルグ指数は約16（きつい、かなりきつい）であり、ほぼ上限に近い値のために差が現れなかったと思われる。また、仕事率は、本人の出せる力が走行環境によって決まるため、８％勾配における100m程度の連続走行においては、同程度の値になったものと考えられる。

横断勾配がなく平坦な避難スロープと比較して、実際の道路スロープでは路面状態によって身体的負担の値が大きく変わることが明らかになった。従って、道路環境と車いす使用者の身体的負担を評価する場合には実際の道路における検証も必要である。

あるいは、代表的な路面形状を有する道路スロープと勾配の基礎データを計測することにより、実験環境から実際の道路における身体的負担を推測する何らかの評価手法を見いだすことが必要である。

3.4　平坦路を基準とした時のスロープの身体的負担評価指標について

各勾配の走行時における身体的負担を評価するため、室内平坦路のデータと比較した。

走行速度3.6㎞/h、ハンドリムを漕ぐストローク数60回/minの条件で、室内平坦路を600m走行した時の平均酸素摂取量代謝指標は0.006l/meter、平均仕事率は15.2Wであった。

平坦路の酸素摂取量代謝指標を基準の「１」とすると、５％勾配実験用スロープは1.5、８％勾配実験用スロープ2.5、避難スロープでは2.8、道路スロープでは3.8の身体的負担に相当する。

同様に仕事率についても、５％と８％勾配実験用スロープは約4.7、避難スロープは3.8、道路スロープでは3.6となり、平坦路と比較した指標を用いることにより、各スロープの身体的負担の大きさを評価することができる。

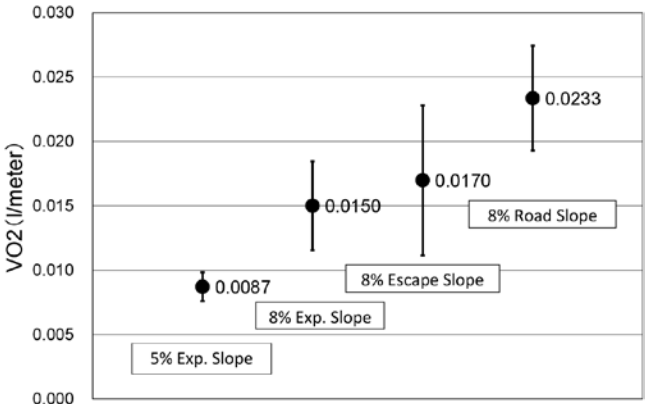


図16　酸素摂取量代謝指標（全スロープ）
Fig.16　O_2 cost index（all slopes）

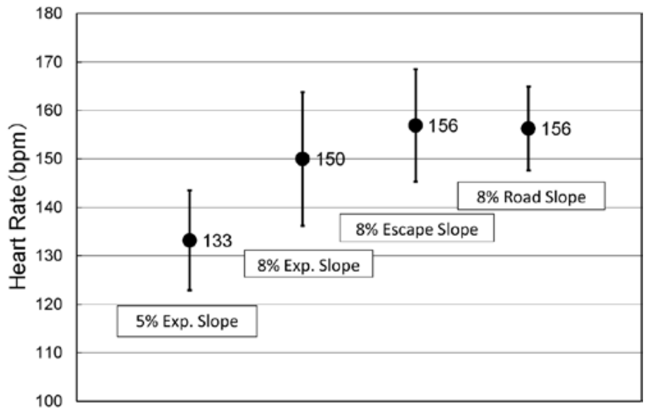


図17　心拍数の変化（全スロープ）
Fig.17　Heart rate（all slopes）

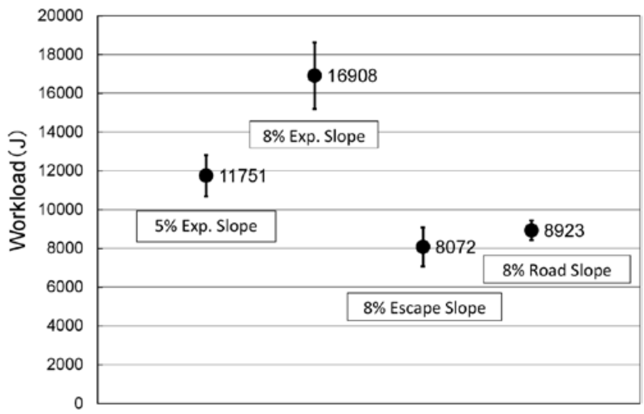


図18　仕事量（全スロープ）
Fig.18　Workload（all slopes）

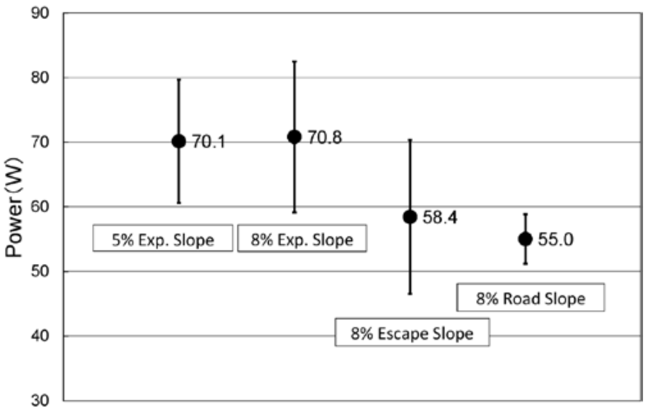


図19　仕事率（全スロープ）
Fig.19　Power（all slopes）

3.5　METsの算出

各スロープを上るときの身体的負担について、運動の負荷を表す指標として一般化しているMETsを算出した。

室内実験用スロープでは、５%勾配は4.2METs、８%勾配は4.4METsであり、両者の差はわずかである。

また、８%勾配避難スロープは5.2METs、約８%勾配の道路スロープは5.4METsであった。なお、5METsは野球程度の運動負荷に相当する。

４　まとめ

酸素摂取量から求めた酸素摂取量代謝指標、心拍数、車いす駆動トルクから求めた仕事量と仕事率を指標としてスロープ走行時の車いす使用者の身体的負荷を客観的に評価する試みを行った。

実験用スロープの８%勾配は５%勾配よりも酸素摂取量代謝指標において1.7倍の値を示し、身体的負担が大きいことがわかった。また、８%勾配で10mの短距離スロープを繰り返し走行する実験方法については、８%勾配で120mの避難スロープの連続走行実験との比較により検証した。両者の酸素摂取量代謝指標の平均値の差に有意差がないことから、短距離スロープの往復により連続走行スロープの評価ができることが明らかになった。この手法は実験に際して物理的制約がある中で、スロープと車いす使用者の身体的負担を客観的に評価する上で有用と思われる。

８%勾配の道路スロープの酸素摂取量代謝指標が避難スロープと比較して1.4倍大きいという差が見られた。原因としては、道路スロープの横断勾配や路面の波打ち等の影響によるものと思われる。

酸素摂取量代謝指標を身体的負荷の指標とした時、平坦路を１とした場合、５%実験用スロープは1.5、８%実験用スロープは2.5、８%勾配の避難スロープは2.8、道路のスロープは3.8となり、身体的負担を比較する指標として利用することが可能である。

本研究において得られた実験結果や実験手法を用いることにより、さまざまな走行環境に対する車いす使用者の身体的負担を評価することが可能であり、道路のバリアフリー化の効果の客観的評価、負担の少ない経路選択や、スロープのユニバーサルデザイン等への応用が可能である。

謝　辞

本研究は森ノ宮医療大学上田喜敏専任講師ならびに宮本忠吉教授、兵庫県立大学土川忠浩教授との共同研究により実施された。また、研究における実験並びにデータ整理等は徳島大学毛利太一氏の修士論文、近畿大学理工学部川口茂明氏の修士論文、松本拓也氏、小山智氏、山本高靖氏の卒業論文の一環として行われたものである。研究の遂行にあたり熱心なご議論とご協力を頂いた皆様に末尾ながら謝意を表します。

本研究の一部は科研費基盤研究（C）（課題番号21560566）の助成を受けて実施された。

参考文献

１）橋詰・北川：車いす使用者の身体的負担の定量化と走行環境に関する研究、平成21年度兵庫県立福祉のまちづくり研究所報告集、pp.106-113、2009
２）橋詰・島村・米田：車いす駆動トルクと酸素消費量による車いす走行効率の考察、日本機械学会福祉工学シンポジウム、pp.15-16、2006
３）村木・三星・松井・野村：車いすによるスロープ走行時の身体的負担の定量化とその応用、土木学会論文集D、pp.401-416、 Vol.62 No.3、2006
４）橋詰・北川・上田・宮本・高見・米田・鎌田・松下・藤澤・末田：車いす走行中のエネルギー代謝と身体的負担の研究、日本機械学会第17回交通・物流部門大会講演論文集、pp. 343-346、2008
５）橋詰・北川・上田・宮本・高見・米田・鎌田・松下・藤澤・末田：車いすがスロープを走行するときのエネルギー代謝と身体的負担の研究、日本機械学会第18回交通・物流部門講演会論文集、pp.309-312、2009
６）橋詰・北川・上田・宮本・高見・米田・鎌田・毛利：スロープ路面と車いす使用者の身体的負担の研究、日本機械学会第19回交通・物流部門講演会論文集、pp.287-290、2010
７）T.HASHIZUME, H.KITAGAWA, et al.: Relationship between wheelchair user's physical load and road environment by energy metabolism and wheelchair driving force, 12th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled Persons (TRANSED 2010), CD-ROM A280, 2010
８）財団法人国土技術研究センター：道路の移動等円滑化整備ガイドライン、大成出版社、2008