

## 横断勾配路での移動における車いす使用者の負担の 定量化と評価

隅田, 康明  
九州大学大学院システム情報科学府情報学専攻 : 博士後期課程

合志, 和晃  
九州産業大学情報科学部情報科学科

松永, 勝也  
九州大学名誉教授

志堂寺, 和則  
九州大学大学院システム情報科学研究院情報学部門 : 教授

<https://doi.org/10.15017/1546784>

---

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 20 (1), pp.1-6, 2015-01-01. 九州大学大学院システム情報科学研究院  
バージョン :  
権利関係 :

# 横断勾配路での移動における車いす使用者の負担の定量化と評価

隅田康明\*・合志和晃\*\*・松永勝也\*\*\*・志堂寺和則†

## Evaluation and Quantification of Burden upon Wheelchair Users on Cross Slope

Yasuaki SUMIDA, Kazuaki GOSHI, Katsuya MATSUNAGA and Kazunori SHIDOJI

(Received November 26, 2014)

**Abstract:** In this paper, we describe how to evaluate the physical and mental burden of the driving force of wheelchair upon the wheelchair users while they are moving a wheelchair on a cross slope. We have conducted the experiment that measures driving force of hand rim on cross slopes. As a result, we have shown that a work load required at the time of slope movement can be predicted with the angle and weight of a slope. In addition, we have shown strong correlation between the physical burden and mental burden.

**Keywords:** Wheelchair user, Barrier free environment, Cross slope, Physical burden, Mental burden

### 1. はじめに

都市のバリアフリー化の推進において、歩道の整備は重要な課題である。路面の勾配は車いす使用者や脚力の衰えた高齢者にとっては大きな負担であり、誰でも円滑に移動できる歩道の整備が望まれている。近年、日本では少子高齢化が深刻な問題となっており<sup>1)</sup>、高齢者人口の増加に伴って、車いす使用者も増加すると予想されることから、高齢者や車いす使用者が円滑に移動できる歩道の整備は今後の社会において重要な課題であるといえよう。

歩道上の勾配は大別すると、進行方向に傾斜した縦断勾配（登り・下り坂）、横断方向に傾斜した横断勾配（右側・左側への傾斜）に分けられる。このうち、横断勾配は排水や車の乗り入れ、車道と歩道の接続（横断歩道など）などの理由により、左右のどちらかに傾斜した勾配である。しかし、車いすによる横断勾配の走行は、勾配の谷側に横流れを防止する必要があることから、左右どちらか一方の手に大きな負担を課し、平坦な道と比べて疲労の度合いも高くなる。さらに、谷側への横流れを防止できない場合には、車道や側溝への転落の危険も考えられる路面環境である。歩道のバリアフリー化を進めるにあたり、車いす使用者が大きな負担なく移動できる環境の整備が必要であるが、歩道周辺の環境などからすべての横断勾配を取り除くことは難しい。

横断勾配移動時における車いす使用者の負担について調べられた研究としては、つぎに挙げるようなものがある。

木村ら<sup>2)</sup>は、横断勾配については2%より大きい場合に負担度が大きく増加するとしている。また、高齢の車いす使用者については鍋島ら<sup>3)</sup>による研究があり、高齢者の車いす走行能力は若年者と比べて低く、高齢者における勾配と段差の適正範囲について、横断勾配1.5%以下が望ましいとしている。

このように、手動車いす使用者にとっては小さな横断勾配も移動時の負担要因となる。そのために、既存の歩道やバリアフリー化が行われた歩道について、車いす使用者が大きな負担なく移動可能であるかどうかを定量的に評価することが重要であると考えられる。横断勾配での車いす使用者の身体的負担について、朝原ら<sup>4)</sup>は車いす使用者の体幹運動に横断勾配が与える影響を駆動トルクと画像処理による三次元動作分析によって調べ、勾配が上がるにつれて体幹屈曲が横断勾配の山側に傾くと報告している。また、米田ら<sup>5)</sup>は車いすの駆動トルクによって横断勾配路面通り抜け時の負担を調べ、走行速度によって身体的負担との関係について評価している。これらの先行研究は、車いすの旋回モーメントが横断勾配の角度と車いす駆動輪と重心との距離によって変化することを示しているが、横断勾配の角度や車いす使用者の体重によって、その路面を移動する際の負担がどの程度増加するか、また、横断勾配路面走行時の車いす使用者の物理的負担と心理的負担の関係について調べられた研究はみられない。

このようなことから、本研究では、横断勾配路面の傾斜角度と車いす搭乗者の体重による身体的負担度の変化、および、物理的負担度と心理的負担度の関係について調べることとした。そして、その結果から路面のバリアフリー度や車いす使用者の身体的、心理的負担度について、定量的に評価可能な指標について検討した。

平成26年11月26日受付

\* 情報学専攻博士後期課程

\*\* 九州産業大学 情報科学部 情報科学科

\*\*\* 九州大学 名誉教授

† 情報学部門

## 2. 横断勾配路での車いす走行実験

### 2.1 測定装置及び実験環境

横断勾配路面走行時における車いす使用者の身体的負担を調べるため、手動車いすのハンドリム周りの駆動トルクと車輪回転角度を毎秒 20 回の周期で測定する手動車いすを用いた<sup>6)</sup>。駆動トルクと車輪回転角度は両輪の測定が行えるように実装した。使用した手動車いすは、重量 16.3kg、車輪の半径 30.4cm、ハンドリムはステンレス製の半径 25.4cm のものを使用した。車輪回転角度は 5 度毎に測定できるものとし、車輪の回転による車いすの移動距離は、車輪回転角度に車輪円周長を乗ずることでとめた。また、ハンドリム周りの駆動トルクに回転角度ごとの移動距離を乗ずることで、ハンドリムの回転運動における仕事量をもとめた。

横断勾配路面での測定は、Table 1 に示す 4 カ所のアスファルト路面で行った。路面の傾斜角度については、デジタル傾斜計 (Digital Protractor Pro3600 : Smart Tool Technologies 社) を用いてスロープの 3 点の傾斜角を測定し、相加平均することでもとめた。測定の際には、無理のない自然な速度でできるだけ直進するように指示し、直進できなかった場合 (走行終了後の車輪回転角度の左右差が 180 度以上の場合) には再度測定を行った。測定は各勾配路につき 2 回ずつ行った。測定した値については、左右のハンドリムの駆動トルクおよび 2 回の走行の値を平均して分析、評価した。実験は健康者 12 名を対象としたが、一名についてはすべての走行において、走行時に車いすの前輪が浮くような操作を行っていたことから、自然な速度での走行ではないと考えられたため除外した。Table 2 に除外した一名を除く実験参加者 11 名の体重(衣服等を含む)、年齢および性別を示す。

Table 1 Experiment environment.

Distance	Angle of slope[Degree]	Gradient[%]
15m	0	0
15m	1.2	2.1
14m	3.9	6.8
10m	5.6	9.7
12m	6.1	10.8

Table 2 List of experimental participants.

	Weight[kg]	Age	Sex
A	49.5	22	M
B	56.0	22	M
C	56.4	22	M
D	57.1	22	M
E	57.6	22	M
F	61.9	29	M
G	58.3	22	M
H	63.3	21	M
I	66.5	21	M
K	78.1	22	M

### 2.2 分析項目

記録した測定データから、つぎに示す 6 項目を算出し、この 6 項目について傾斜角度と体重による影響を調べることとした。

- 平均駆動力(Average driving torque) : 走行時のハンドリム駆動力の相加平均値
- 最大駆動力(Max driving torque) : 走行時のハンドリム駆動力の最大値
- ストローク平均駆動力 (Driving torque per stroke) : 走行時のハンドリム駆動力の総和/ストローク回数
- ストローク平均仕事量(Power per stroke) : 走行時の仕事量のストローク平均値
- 距離平均仕事量(Power per meter) : 走行時の仕事量の距離平均値
- 仕事率(Power) : 走行時の仕事量の時間平均値(1 秒毎)

また、心理的な負担については、各勾配路面を 2 回走行した後に、口頭で「最初に走行した勾配なしの路面での「負担度」を 10 とし、今走行した勾配路の「負担度」を数値で表して下さい。」との聞き取り調査を行った。分析での統計処理にあたっては、統計ソフト R(ver.3.1.0)を使用した。

### 2.3 測定結果

測定結果から各分析項目を算出し、それぞれの基本統計量 (95%信頼区間, 標準偏差, 最大値, 最小値) をもとめたものを Table 3 に、Fig. 1 に傾斜角度別の平均値と標準偏差を示す。

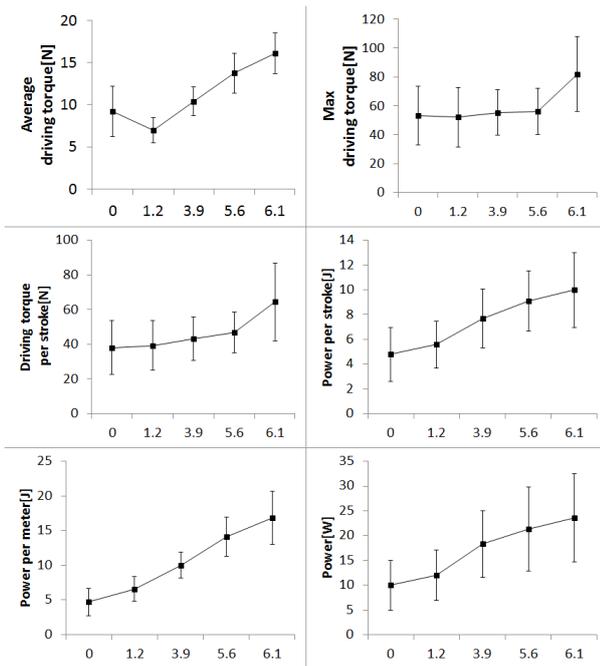


Fig.1 MEAN and SD of each degree of slope.

Table 3 Fundamental statistics of measurement value.

	95%CI	SD	Max	Min
Average driving torque	11.29 ± 1.06	3.93	19.40	5.04
Max driving torque	59.89 ± 6.06	22.42	142.18	19.71
Driving torque per stroke	78.92 ± 9.27	34.30	201.85	19.56
Power per stroke	7.42 ± 0.83	3.07	14.84	1.93
Power per meter	10.46 ± 1.4	5.20	22.11	1.59
Power	17.06 ± 2.32	8.60	45.05	3.20
Number of sample		55		

### 2.4 傾斜角度と重量の影響分析

各分析項目に対して傾斜角度と重量(体重に車いすの重量を加えたもの)が与える影響を調べるために、各分析項目を目的変数、傾斜角度と重量の2つの変数を説明変数とした重回帰分析を行った。説明変数とした傾斜角度と重量との間には相関関係はなく( $r < 0.01$ ,  $p = 1.00$ )、多重共線性を起こす可能性はないものと判断した。Table 4 に重回帰分析の結果を示す。回帰モデルの当てはまりの良さを示す自由度調整済み決定係数は、平均駆動力( $R^2_{adj} = 0.61$ ,  $p < 0.01$ )、最大駆動力( $R^2_{adj} = 0.89$ ,  $p < 0.01$ )、ストローク平均駆動力( $R^2_{adj} = 0.34$ ,  $p < 0.01$ )、ストローク平均駆動力( $R^2_{adj} = 0.64$ ,

$p < 0.01$ )、距離平均仕事量( $R^2_{adj} = 0.84$ ,  $p < 0.01$ )、仕事率( $R^2_{adj} = .55$ ,  $p < 0.01$ )であった。

つぎに、説明変数が目的変数に与える影響度を示す標準化偏回帰係数(標準化  $\beta$ )の値から傾斜角度と重量それぞれの目的変数に対する寄与率をみる。最大駆動力における傾斜角度の標準化  $\beta$  については、危険率 5%水準で有意なものではなかったが( $p > 0.05$ )、その他の目的変数では危険率 1%水準で有意であった。最大駆動力以外の標準化  $\beta$  値において大きな差があったのは、距離平均仕事量(傾斜角度 0.86, 重量 0.32, 0.54 の差)、平均駆動力(傾斜角度 0.74, 重量 0.27, 0.47 の差)であり、そのほかの項目については大きな差はみられなかった。

Table 4 Results of multiple regression analysis.

Objective variable	Explanatory variable	Standard $\beta$	$R^2_{Adj}$
Average driving torque	A	0.74 **	0.61 **
Max driving torque	W	0.27 **	
Driving torque per stroke	A	0.34 †	0.89 **
Power per stroke	W	0.38 **	
Power per meter	A	0.43 **	0.34 **
Power	W	0.42 **	
Power per stroke	A	0.65 **	0.64 **
Power per meter	W	0.48 **	
Power	A	0.86 **	0.84 **
Power	W	0.32 **	
	A	0.62 **	0.55 **
	W	0.44 **	
Degree of freedom		54	

A: Angle of slope, W: Weight

$\beta$  : Partial regression coefficient,

$R^2_{Adj}$  : Adjusted R-square

\*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , †  $p \geq 0.05$

### 2.5 心理的負担度

各勾配路を走行後に口頭調査した主観負担度(マグニチュード推定値)については、実験参加者ごとに回答値の上限が一定でない。そのため、回答値を実験参加者ごとに標準化した上で評価した(以降、標準化した主観負担度を標準化負担度と呼ぶ)。Fig. 2 に傾斜角度別に平均化した標準化負担度を縦軸に、傾斜角度を横軸とした散布図を示す。傾斜角度と標準化主観度の傾斜毎の平均値との間に強い相関関係( $r = 0.89$ ,  $p < 0.01$ )がみられた。また、標準化負担度と各項目との相関係数を Table 5 に示す。標準化負担度と傾斜角度、平均駆動力、距離平均仕事量との間に有意な強い正の相関関係( $r_s > 0.70$ ,  $p < 0.01$ )が認められた。標準化負担度を

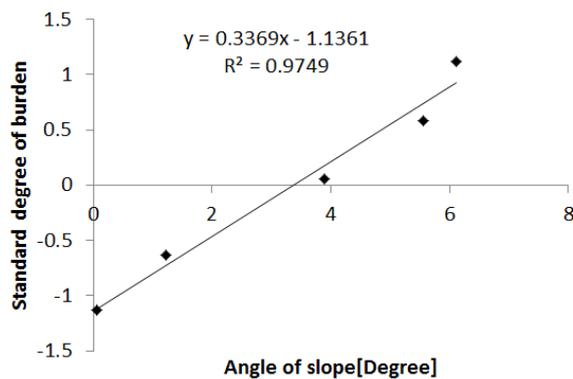
縦軸とした平均駆動力、距離平均仕事量との散布図を Fig. 3, Fig. 4 に示す。

**Table 5** Correlations between standard degree of burden and physical burden and angle of slope.

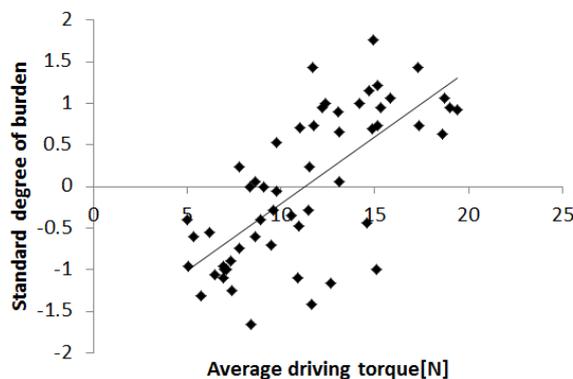
	Standard degree of burden	
Average driving torque	0.89	**
Max driving torque	0.70	**
Driving torque per stroke	0.36	**
Power per stroke	0.45	**
Power per meter	0.60	**
Power	0.79	**
Average driving torque	0.55	**

A: Angle of slope, W: Weight

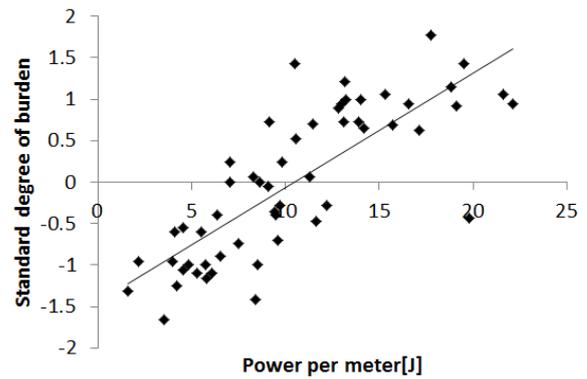
\*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , †  $p \geq 0.05$



**Fig.2** Correlation between standard degree of burden and degree of slope.



**Fig.3** Correlation between standard degree of burden and average driving torque.



**Fig.4** Correlation between standard degree of burden and average driving torque.

### 3. 回帰式による物理負担度の予測

#### 3.1 実験目的

重回帰分析の結果、傾斜角度と重量による各目的変数に対する説明力は有意なものであり、回帰式による予測が妥当な精度で行えるものと考えられた。この予測が高い精度で行えるのであれば、既知の傾斜の横断勾配路面を車いすで走行した際の身体的負担の推定や、車いす使用者の身体的負担にもとづいたバリアフリー度の評価、それにもとづいた身体的負担の少ない経路の提示など、様々な分野での応用が期待できる。そこで、傾斜角度と重量の積からなる交互作用項を投入したステップワイズ法による重回帰分析を行った。それぞれの目的変数について、モデルの当てはまりの良さを表す指標である AIC が最も小さい値を取った重回帰式を(式 1)~(式 6)に示す。ステップワイズ法の結果、平均駆動力( $R^2_{adj}=0.64, p<0.01, AIC=97.59$ )と距離平均仕事量( $R^2_{adj}=0.86, p<0.01, AIC=77.33$ )については、交互作用項を投入した回帰モデルが最も AIC の値が小さく、また、分散分析の有意確率が 5%水準で有意であった。

$$\text{Average driving torque} = -2.11 * A - 0.0003 * W - 0.004 * D * W + 7.42 \quad (\text{式 1})$$

$$\text{Max driving torque} = -0.03 * A + 0.96 * W + 1.63 \quad (\text{式 2})$$

$$\text{Driving torque per stroke} = 3.24 * A + 0.10 * W - 41.53 \quad (\text{式 3})$$

$$\text{Power per stroke} = 0.83 * A + 0.02 * W - 10.34 \quad (\text{式 4})$$

$$\text{Power per meter} = -1.12 * A + 0.009 * W + 0.004 * D * W - 3.03 \quad (\text{式 5})$$

$$\text{Work Power} = 2.21 * A + 0.05 * W - 28.86 \quad (\text{式 6})$$

### 3.2 実験環境

測定実験と同じ横断勾配路面(**Table 1**)を測定実験と同じ手順によって走行させた。その際に、実験参加者には重りを持たせることによって、5kg 刻みでの重量の変化を調べることとした。これは、重回帰式による推定値の検証をより広い範囲で行う目的のためである。**Table 6** に検証実験での実験参加者、**Table 7** に各実験参加者の走行時の重量を示す。なお、実験参加者 F と K については、**Table 2** 中の実験参加者 F、K と同一であるが、2 章での測定実験との間に体重の増減があったため、検証実験時点での体重を改めて示している。

検証実験での測定結果を **Table 8** に示す。

**Table 6** List of experimental participants.

	Weight[kg]	Age	Sex
F	59.5	29	M
K	79.5	22	M
M	44.5	24	M
N	68.0	31	M
O	69.9	22	M

**Table 7** Added weight on participants.

	Weight1[kg]	Weight2[kg]	Weight3[kg]
F	60.0	65.0	-
K	80.0	85.0	-
M	45.0	50.0	55.0
N	70.0	75.0	-
O	70.0	-	-
- No weight			

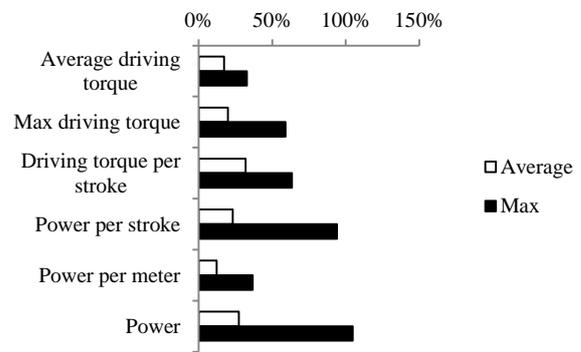
**Table 8** Fundamental statistics on measured values.

	95%CI	SD	Max	Min
Average driving torque	11.84±2.09	5.59	22.84	4.87
Max driving torque	67.49±7.56	20.24	124.86	37.95
Driving torque per stroke	39.62±5.21	13.69	75.75	19.73
Power per stroke	9.98±1.58	4.24	22.10	3.39
Power per meter	12.52±2.32	6.22	24.06	4.60
Power	24.87±4.5	12.04	56.22	9.72
Number of sample	30			

### 3.3 回帰式による予測精度

2 章での測定実験結果によって得られた(式 1)~(式 6)の回帰式によって、平均駆動力、最大駆動力、ストローク平均駆動力、ストローク平均仕事量、距離平均仕事量、仕事率を予測し、検証実験での実測値とそれぞれ比較した。

重回帰式による予測値と実測値の差(以降、予測誤差と呼ぶ)の傾斜別の相対誤差の平均値と最大値を **Fig. 5** に示す。平均駆動力と距離平均仕事量については、平均相対誤差、最大相対誤差ともに小さく、絶対誤差についても平均駆動力が約 2.1N、距離平均仕事量が約 0.76J と小さいものであった。その他の項目については、50%以上の相対誤差が生じており、回帰式による予測を行う際には、平均駆動力又は距離平均仕事量が適しているものと考えられる。



**Fig.5** Relative error of between measured and estimated values.

## 4. 考察

### 4.1 傾斜角度、重量の影響について

傾斜角度と重量双方の影響力をみるために、傾斜角度と重量を説明変数とした重回帰分析を行った結果、標準化偏回帰係数の値から各分析項目に対する寄与率は傾斜角度の方が大であるが、重量の影響も小さいものではないものと考えられた。また、ステップワイズ法による重回帰分析の結果においても、すべての分析項目について傾斜角度だけでなく重量を含めた回帰モデルの AIC が高かったことから、重量は車いす走行時の身体的負担に無視できない影響力を持つものと考えられる。

重回帰式による物理負担量の推定については、異なる条件で行った測定結果についても、平均駆動力と距離平均仕事量の 2 項目は相対誤差、絶対誤差ともに小さい結果であった。主観負担度との相関についても、この 2 項目が高い正の相関関係を示しており、傾斜角度と重量による路面の評価を考えた場合には、この 2 項目を利用する事が適当だと考えられる。ただし、本研究では重回帰分析による予測を行っているため、より幅広い重量による測定を行い、そ

の結果をもとにした重回帰分析を行えばより精度のよい予測が可能であると予想できる。

## 4.2 本研究の成果の応用

以上のことから、既知の傾斜角度の横断勾配路を車いすで走行した際の、身体的負担を車いす使用者の重量(体重+荷重)によって予測することが可能であり、その予測値によって路面の走行難度を評価できるものと考えられる。予測できる値は、その路面を車いすで走行した際に平均的に発揮する必要がある駆動力、又は仕事量であり、実際の車いす走行における負担にもつづいた評価指標といえる。また、心理的負担度とも強い正の相関関係があったことから、車いす使用者の感じる心理的負担にも考慮した評価を行えるものと考えられる。

また、予測精度の検証実験結果では、平均駆動力と距離平均仕事量の予測誤差が小さく、重回帰分析の結果も含めて考えると、車いす走行における路面の傾斜(縦断、横断)角度と重量による物理負担および心理負担度の評価指標としては、距離平均仕事量を用いるのが妥当ではないかと考えられる。

本研究の成果により、車いす使用者向けの経路探索への応用が期待できる。例えば、距離平均仕事量は距離(1m)当たりの仕事量であることから、経路の距離と傾斜角度を記録している経路探索システムであれば、目的地までの物理負担量および、心理負担量のより小さい経路の選択を行うことができる。また、既知の傾斜角度の横断勾配路であれば、車いす使用者の身体的負担にもつづいたバリアフリー度の評価を行える。

ただし、本研究においては重回帰式による予測を行ったため、その予測においては予測区間内の誤差を見込んでおく必要がある。重回帰分析の説明変数となる傾斜角度と重量をより細かく設定し、サンプル数を増やした上で重回帰式をもとめれば、より精度の高い予測が可能になるものと考えられる。また、傾斜角度を自由に変更可能なスロープによって、傾斜角度と重量を細かく変えて測定する事によって、傾斜角度と重量に対応する平均駆動力、距離平均仕事量の換算表を作成すれば、未知要因による誤差の生じない予測ができるものと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、車いすを移動させるために必要な力が横断勾配路面の傾斜角度や車いす搭乗者の体重によってどのような影響を受けるのかについて調べ、それをもとにした路面のバリアフリー度の評価を行うに適した指標を調べることを目的とした。

平均駆動力、最大駆動力、ストローク平均駆動力、スト

ローク平均仕事量、距離平均仕事量、仕事率の6項目について、傾斜角度と重量(車いす使用者の体重と荷重)の影響を調べた結果、傾斜角度と重量の車いす走行における物理負担量に対する影響力の度合いを明らかにした。また、平均駆動力と距離平均仕事量については、傾斜角度と重量を説明変数とした重回帰式によって、妥当な精度で予測を行えることを示した。この2項目については、心理的負担度との間に強い正の相関関係が認められたことから、平均駆動力や距離平均仕事量による路面の評価を行うことで、間接的にはあるが、心理的負担の大小も評価できるものと考えられる。ただし、本研究での測定実験はすべてアスファルト路面で行ったため、材質の異なる路面での測定を行い、材質による身体的負担、心理的負担の変化について調べることも必要だと考えられる。

今後は、材質の異なる路面での測定実験を行い、これらの路面での負担度の推定を行える指標を明らかにする。また、本研究における心理的負担度の評価では、実験参加者ごと、すなわち重量ごとに回答値の標準化を行ったために、重量の違いによる心理的負担については評価することができなかった。車いす使用者の体重が走行時の心理的負担度にもどのような影響があるかについて明らかにしていくことも今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) 内閣府:平成 25 年版 高齢社会白書,印刷通販 (2013).
- 2) 木村 一裕,清水 浩志郎,伊藤 誉志広,呉 馨欣,車いす走行におけるバリアフリー度の評価方法に関する研究,土木計画学研究・論文集, No.17, pp.973-980 (2000).
- 3) 鍋島益弘, 山田優:車いすを利用する高齢者のための歩道構造に関する研究. 土木学会論文集, No.725, pp.157-169(2003).
- 4) 朝原早苗, 岩崎温子, 加藤葵, 小林彩美, 山本智史:横断勾配が手動車いす駆動のトルクと体幹運動に与える影響について, 日本機械学会福祉工学シンポジウム講演論文集 2009, pp. 229-230(2009).
- 5) 米田郁夫, 橋詰努, 室崎千重, 糠谷佐紀, 末田統, 藤澤正一郎, 鎌田実:横断勾配が手動車いすの走行に及ぼす影響とその対策に関する考察, 福祉工学シンポジウム講演論文集 2006, pp. 29-32(2006).
- 6) 隅田康明, 林政喜, 合志和晃, 松永勝也:経路探索用データ作成のための電動車いすの走行負荷に基づく手動車いすでの移動に必要な力量の推定方法, 情報処理学会論文誌(54 巻 1 号), pp.146-155(2013).