

歩道路面の平坦性と 車椅子走行に要する推進力の関係

石田眞二¹・亀山修一²・川端伸一郎²・姫野賢治³・鹿島 茂³

¹正会員 修士（工） 北海道工業大学講師 工学部社会基盤工学科
（〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1）

²正会員 博士（工）北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科
（〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1）

³フェロー 博士（工）中央大学教授 理工学部土木工学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

歩道の段差や縦断・横断勾配は、高齢者や障害者の円滑な移動にとって大きな障害となるが、例えば、縦断・横断勾配や段差が小さい歩道であっても、路面の平坦性が悪い場合は、路面の凹凸を乗り越えるために平坦な路面よりも大きな推進力が必要となる。本研究では、延長が5m、縦断勾配が2～10%の歩道8区間および路面の平坦性が悪い住宅街の歩道45区間において縦断プロファイル測定を実施するとともに、車椅子を一定速度で走行させたときに要した後輪軸のトルクを測定した。歩道の縦断勾配と車椅子の走行に要するトルクの関係性を明らかにするとともに、歩道路面の平坦性と車椅子の走行に要する推進力の関係についても検討した。

Key Words : transportation accessibility, sidewalk, longitudinal profile, Evenness, wheelchair, torque

1. はじめに

わが国では、道路は高度経済成長を支える重要な社会基盤施設として位置づけられ、急ピッチで整備が進められてきた。従来、歩道は車道の付加構造物として設計、施工される傾向にあり、歩行者へのサービスに十分配慮してきたとは言いがたい。車道舗装に関しては、ひび割れ、平坦性、わだち掘れやすべり抵抗などに関する基準が設けられているが、歩道舗装に関する基準は定性的に記述されているだけであり¹⁾、歩行者の安全性や快適性に基づいた明確な基準はない。その結果、凹凸、勾配、段差が大きい歩道が数多く見られ、高齢者や障害者の円滑な移動に対する大きな障害（交通バリア）となっている²⁾。

そこで、平成12年、公共構造物における交通バリアの解消を目的として「高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」（通称「交通バリアフリー法」）³⁾が制定された。国土交通省は、これを受けて、「歩道における段差及び勾配等に関する基準」⁴⁾を設け、歩道のバリアフリー化を進めている。この基準は、①歩行者の安全かつ円滑な移動を確保するために歩道内において

は有効幅員2m以上の平坦部を連続して確保する②歩道内における縦断勾配は5%以下、横断勾配は1%を標準とする③歩道と車道の接合部の段差は2cmを標準とし、その他の歩行者の通行箇所には段差を設けない、という3つの基準を設けている。これらの基準を満たした歩道を整備するには、歩道の縦断および横断プロファイルを容易かつ高精度で測定することが必要であることから、近年、運搬性や操作性に優れた高精度の小型プロファイラが歩道のプロファイル測定に用いられている^{5), 6)}。

歩道の段差は高齢者の転倒事故をもたらしたり、車椅子による走行を不可能にする。また、歩道の縦断・横断勾配は健常者にとっては大きな障害にならなくても、高齢者や障害者、特に、車椅子利用者にとっては走行上の大きな障害となる。横山らは、車椅子利用者の登坂および降坂走行実験によって、車椅子が容易に走行可能な縦断勾配の上限値は5%、安定した走行が可能な限界勾配長は5%勾配区間で25mであることを示している⁷⁾。

一方、例えば、段差や縦断・横断勾配が小さい歩道であっても、路面の平坦性が悪い場合には、車椅子が走行する際に振動が生じたり、路面凹凸を乗り越

える際に平坦部よりも大きな推進力を必要とする。牧らは、車椅子に加速度計を取り付け、走行させたときに生じる鉛直方向加速度を測定し、車椅子走行の快適性を評価することを試みているが⁸⁾、路面の平坦性と車椅子走行に要する推進力（走行推進力）の関係について検討した例はほとんど見られない。

車椅子走行の動力源は車椅子利用者の上半身の筋力であることから、路面の平坦度に起因する車椅子の走行推進力は利用者の負担度（つらさ）や疲労度を左右する重要な因子である。そこで、本研究では、車椅子を一定速度で走行させるために要する後輪軸のトルクから路面の平坦度に起因する車椅子の走行推進力を求める方法を確認し、さらに歩道の縦断プロファイルから算出される路面の平坦度と車椅子の走行推進力との関係を明らかにすることを目的とした。

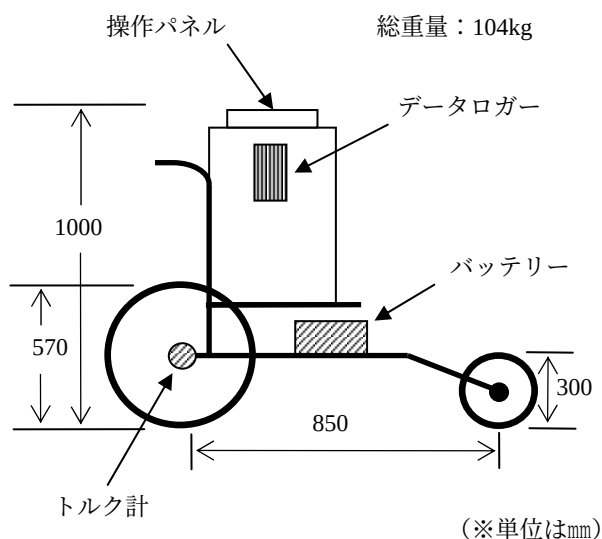


図-1 車椅子走行トルク測定装置

2. 車椅子走行トルク測定装置の開発

市販されている車椅子を改良し、車椅子を一定速度で直進走行させた際に要した駆動輪（後輪）のトルクを測定する装置（以後、車椅子走行トルク測定装置と称す）を作成した。本装置の諸元および測定・制御ユニットを図-1、写真-1に示す。通常用いられている車椅子は、固定されていない2個の前輪（直径約150mm）と左右が独立して回転する後輪を有しており、左右の後輪に加える力の配分を調節することによって進行方向を決める。この状態にモータを取り付け、自力走行させた場合、直進走行することは不可能であることから、前輪を固定された直径300mmの1輪に交換するとともに、左右の後輪の中心を軸で連結し、搭載したバッテリーからの電力で軸を回転させて走行する形式とした。その結果、前輪と後輪の距離（ホイールベース）は850mmとなり、通常用いられている車椅子よりも約350mm長くなった。

車椅子を一定速度で走行させるのに要した電圧は、後輪軸に取り付けられたトルク計によって1秒間隔で計測され、データロガーに格納される。測定開始、終了、測定データの保存などは操作パネルで実行可能である。本装置では、走行速度を既往の研究⁹⁾から得られている車椅子の平均速度（1.07m/sec）に設定することが可能であるが、電圧測定が1秒間隔であることから、走行速度を早くしすぎると局所的な路面の凹凸に対応するトルクを確実に測定できない。そこで、本研究では、測定速度を本装置の最低

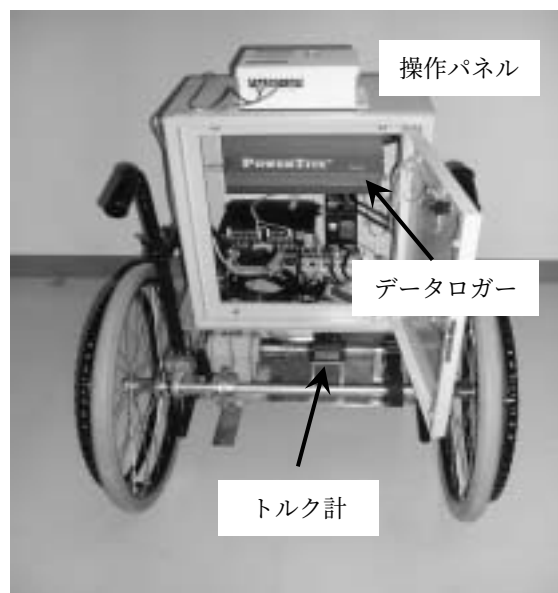


写真-1 車椅子走行トルク測定装置の測定および制御ユニット

測定速度近傍の0.167m/secに設定した。

一例として、延長5m、縦断勾配7%の平坦な歩道において、本装置によって測定された登坂方向と降坂方向の電圧、およびこれと同じ時間（31秒間）だけ後輪を空転させたときに測定された電圧を図-2に示す。後輪を空転させたときの電圧は0とはならず、平均値が-0.039Vになった。登坂方向の電圧は空転時の電圧よりも小さく、逆に、降坂方向では空転時よりも大きな電圧となった。本装置が走行する際に要した電圧は、測定電圧から空転時の電圧を差引いた値と考えられることから、測定区間を走行するた

表-1 測定区間の諸元と測定された車椅子走行トルク

区間	方向	終点高さ (m)	勾配 (%)	平均 (V)	標準偏差 (V)
1	登坂	0.348	7.0	-0.469	0.013
	降坂	-0.348	-7.0	0.321	0.005
2	登坂	0.270	5.4	-0.382	0.007
	降坂	-0.270	-5.4	0.235	0.008
3	登坂	0.405	8.1	-0.539	0.011
	降坂	-0.405	-8.1	0.390	0.010
4	登坂	0.456	9.2	-0.614	0.012
	降坂	-0.456	-9.2	0.437	0.010
5	登坂	0.478	9.6	-0.627	0.013
	降坂	-0.478	-9.6	0.466	0.005
6	登坂	0.251	5.0	-0.357	0.008
	降坂	-0.251	-5.0	0.217	0.008
7	登坂	0.108	2.2	-0.194	0.007
	降坂	-0.108	-2.2	0.057	0.016
8	登坂	0.191	3.8	-0.296	0.009
	降坂	-0.191	-3.8	0.141	0.007

めに要した電圧の平均（平均測定電圧と称する）は式（1）で表される．

$$E_{Ave} = \frac{\sum_{i=1}^N (e_i - E_a)}{N} \quad (1)$$

ここで、

- E_{Ave} : 平均測定電圧 (V)
- N : データ数
- e_i : 測定電圧 (V)
- E_a : 後輪空転時の平均電圧 (-0.039V)

3. 歩道の縦断勾配と車椅子走行トルクの関係

札幌市手稲区の歩道（アスファルト舗装）から、2～10%の縦断勾配を有し、かつ、目視によって平坦性が良いと判断された区間を9箇所選び、各区間において、登坂および降坂方向の車椅子走行トルクを5回測定した．なお、事前調査では、歩道端部のすり付け部分、および車庫や駐車場の車両乗入部など勾配や凹凸が大きい区間の延長が5m以内であったことから、今回の測定では区間長を5mとした．

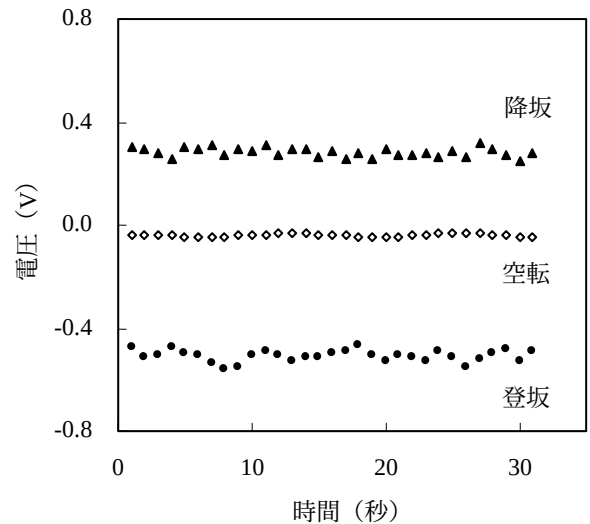


図-2 車椅子走行トルク測定装置の測定データ例
(測定区間長5m, 縦断勾配7%)

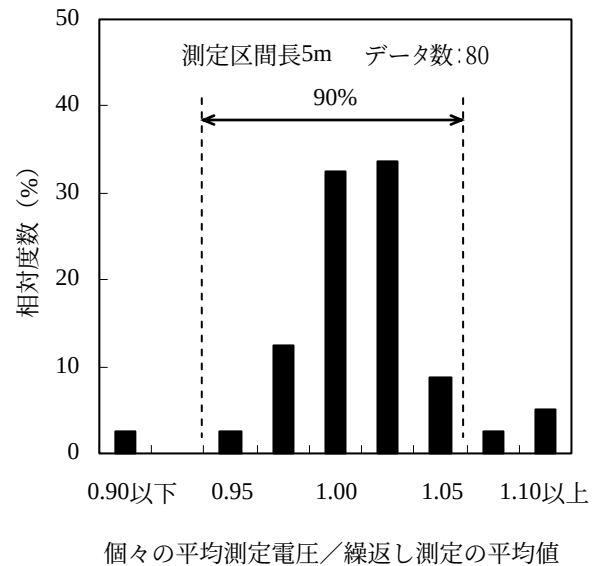


図-3 車椅子走行トルク測定装置の反復性

各測定区間の始点高さに対する終点高さ、勾配、平均測定電圧 (E_{Ave}) の平均値と標準偏差を表-1に示す．各測定区間における平均測定電圧の標準偏差に大きな差は見られず、その範囲は0.005～0.016Vであった．

全ての測定区間において5回の繰返し測定をおこなっていることから、個々の測定から得られた平均測定電圧を繰返し測定の平均値で除した値を求め、その度数分布に基づいて本装置の反復性を評価した．測定結果から得られたヒストグラムを図-3に示す．

(個々の平均測定電圧) / (繰返し測定の平均値)

の値が0.95～1.05，すなわち，繰り返し測定の平均値の±5%に含まれるデータは全体の90%に達することから，本装置の反復性は十分に高いと考えられる。

測定区間の始終点の高低差（縦断勾配）と平均測定電圧の平均値の関係を図-4に，回帰式を式（2）に示す．なお，降坂方向では，終点高さが始点高さよりも低くなることから，始終点の高低差および縦断勾配は負で表される．

$$\overline{E_{Ave}} = -1.146 \times h - 0.076 \quad (2)$$

ここで，

$\overline{E_{Ave}}$: 平均測定電圧の平均 (V)

h : 始終点の高低差 (m)

回帰式の R^2 値が非常に高いことから，上式を用いることによって測定区間の始終点の高低差から測定区間内を本装置が走行する際に要する平均電圧，すなわち車椅子の平均走行トルクを推定できると言える．

4. 歩道路面の平坦性と車椅子の走行推進力

(1) 測定の概要

現在，供用されている市街地や住宅街の歩道では，歩道端部のすり付け部分や車両乗入部など路面の平坦性が悪くなっている区間が多い．そこで，路面の平坦性と車椅子の走行推進力の関係について検討するために，札幌市手稲区の住宅街の歩道（アスファルト舗装）から延長5mの測定区間を45箇所選び，縦断プロファイルおよび車椅子走行トルク測定を実施した．Dipstickによって測定された路面高さデータを水準測量から得られた始終点の高さで補正し，サンプリング間隔250mmの縦断プロファイルを得た．また，車椅子走行トルク測定装置による測定は全測定区間で3往復実施した．

測定をおこなった45測定区間の縦断勾配の分布を図-5に示す．始終点の高低差が±10cm（縦断勾配が±2%）の範囲に入ったのは全測定区間の約95.6%であった．なお，この範囲に入らなかった測定区間は歩道端部のすり付け部分を含む区間であった．測定区間の大部分は縦断勾配が緩やかであったが，車庫や駐車場前の車両乗入部，パッチング，マンホールなどによって路面の平坦性が悪くなっている測定区間も含まれる．

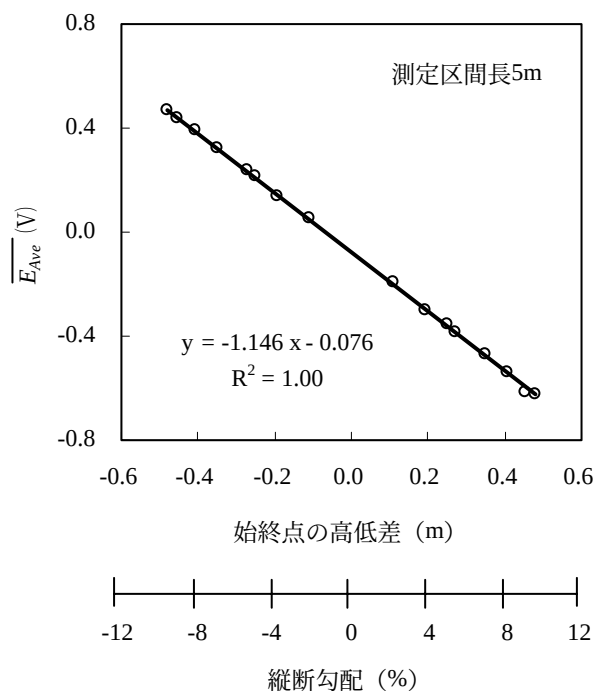


図-4 始終点の高低差（縦断勾配）と $\overline{E_{Ave}}$ の関係

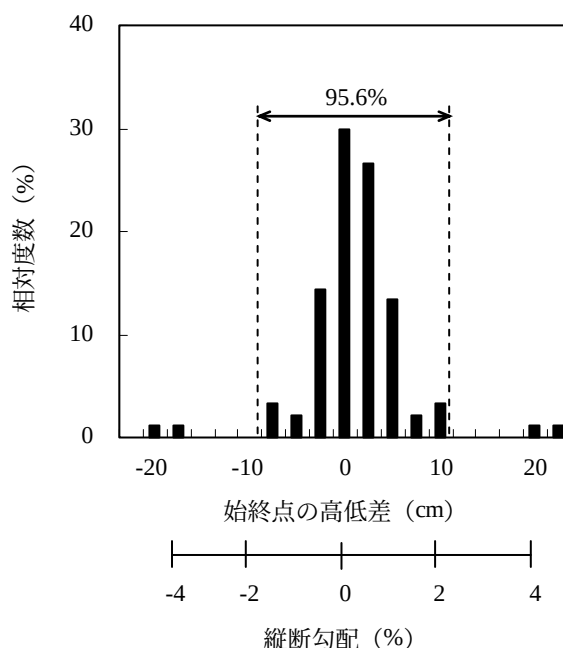


図-5 測定区間の始終点の高低差（縦断勾配）の分布

一例として，路面の平坦性が悪い測定区間No.37の縦断プロファイルと車椅子走行トルク測定装置によって測定された電圧を図-6に示す．縦断プロファイルの下り部分では電圧が増加，逆に，上り部分では電圧が減少する傾向があることに加え，多少の差はあるものの，縦断プロファイルの凹部に測定電圧の凸部（その反対も同様）が対応している．

(2) 路面の平坦性に起因する車椅子の走行推進力の定量化

図-6に示した測定区間No.37の始終点の高低差は0.023m（縦断勾配0.5%）であることから、車椅子走行トルク測定装置の平均測定電圧は式（2）によって-0.112Vと推定される。もし、測定区間No.37の路面の平坦性が良ければ、図-2のように、測定電圧は平均値の近傍に集まり、変動は小さい。しかしながら、当該測定区間では、路面の凹凸によって電圧が大きく変動しており、図-7のハッチング部のように測定電圧が式（2）から推定される平均測定電圧よりも低くなる部分が存在する。これは、局所的な路面の凹凸を乗越えるときに要した車椅子のトルクを表していると考えられることから、本研究では、式（3）によって計算される電圧の累積値を路面の平坦性に起因する車椅子の走行推進力と考えた。ただし、測定区間の縦断勾配が負となる場合は、式（2）によって推定される縦断勾配0%の平均電圧 E_0 （-0.076V）から測定電圧を引いた値の累積を車椅子の走行推進力と考えた。

$$L_r = \sum_{i=1}^N e_r \quad (3)$$

測定区間の縦断勾配 $\geq 0\%$ の場合、

$$e_r = E_m - e_i$$

ただし、 $e_i > E_m$ のとき、 $e_r = 0$

測定区間の縦断勾配 $< 0\%$ の場合、

$$e_r = E_0 - e_i$$

ただし、 $e_i > E_0$ のとき、 $e_r = 0$

ここで、

L_r : 路面凹凸に起因する車椅子の走行推進力 (V)

E_m : 式（2）から推定される平均測定電圧 (V)

E_0 : 縦断勾配0%のときの平均電圧 (-0.076V)

e_i : 測定電圧 (V)

N : データ数

なお、今回の調査では、各測定区間において3回の測定をおこなっていることから、各測定回で求めた L_r の平均値を以後の解析に用いた。

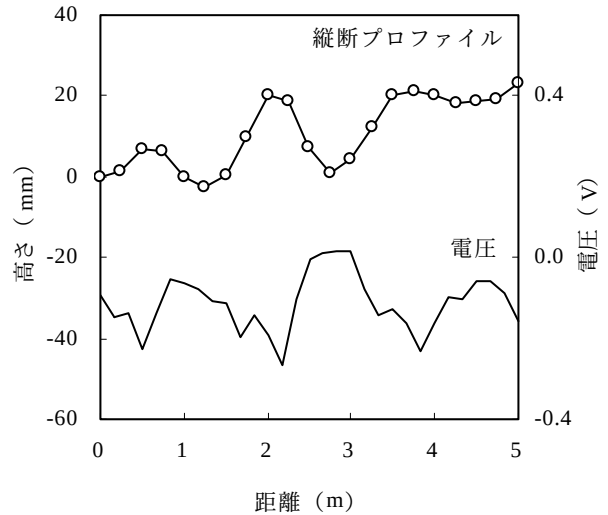


図-6 縦断プロファイルと測定電圧（測定区間No.37）

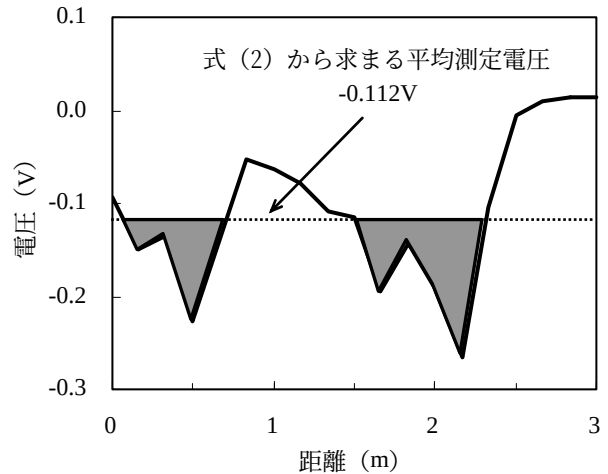


図-7 路面の平坦性に起因する車椅子の走行推進力
（測定区間No.37、0～3mを拡大）

(3) 車椅子の走行推進力に影響を及ぼす路面の平坦度の算出

前節では、測定区間の縦断勾配が0%以上の場合、路面凹凸によってもたらされる車椅子の走行推進力は、式（2）から求まる平均電圧よりも低い電圧の累積値で表されると定義したことから、本研究では、車椅子の走行推進力をもたらす路面の平坦度（以下、単に路面平坦度と称す）は、一般的な車椅子のホイールベース500mmに相当する2点間の勾配が測定区間の縦断勾配よりも大きくなる部分の高低差の累積値で表されると考えた。ただし、測定区間の縦断勾配が0%より小さい場合の路面平坦度は、縦断プロファイルの2点間の勾配が0%以上となる部分の高低差の累積値で表される。

例えば、延長5m、終点高さが50mm（縦断勾配1%）の測定区間では、図-8のように、500mm離れ

た2点の高低差が5mm以上となる区間の高低差の累積値 $h_A+h_B+h_C$ が路面平坦度となる。

一方、**図-8**に示した範囲を逆方向に進む場合（復路）では、測定区間の始点の高さが50mm、終点の高さが0mm（縦断勾配が-1%）となることから、路面平坦度は、**図-9**に示すように2点間の勾配が0%以上である区間の高低差の累積値 h_D+h_E となる。

以上のことをまとめると、延長5m、サンプリング間隔250mmの縦断プロファイルが得られている場合、車椅子の走行推進力に影響を及ぼす路面平坦度は式（5）～（6）によって表される。

$$H_l = \sum_{i=1}^{N-2} \Delta h_i \quad (5)$$

$$\Delta h_i = h_{i+2} - h_i \quad (6)$$

測定区間の縦断勾配 $\geq 0\%$ の場合、

$$\Delta h_i < \frac{h_E - h_S}{10} \text{ のとき, } \Delta h_i = 0$$

測定区間の縦断勾配 $< 0\%$ の場合、

$$\Delta h_i < 0 \text{ のとき, } \Delta h_i = 0$$

ここで、

H_l : 路面平坦度 (m)

h_i : 路面高さ (m)

h_S : 始点の高さ (m)

h_E : 終点の高さ (m)

N : データ数

(3) 路面平坦度と車椅子の走行推進力の関係

全測定区間47箇所において測定した縦断プロファイルから往路と復路の路面平坦度 H_l を、車椅子走行トルク測定装置の測定データから往路と復路の車椅子走行推進力 L_r を算出した。両者の関係は**図-10**に示すようになり、式（7）に示す回帰式が得られた。

$$L_r = 16.17 \times H_l + 0.35 \quad (7)$$

回帰式の R^2 値が十分高い値を示していることから、延長5mの縦断プロファイルから計算される路面平坦度 H_l を式（7）に代入することで路面の平坦性に起因する車椅子の走行推進力を推定できると考えられる。

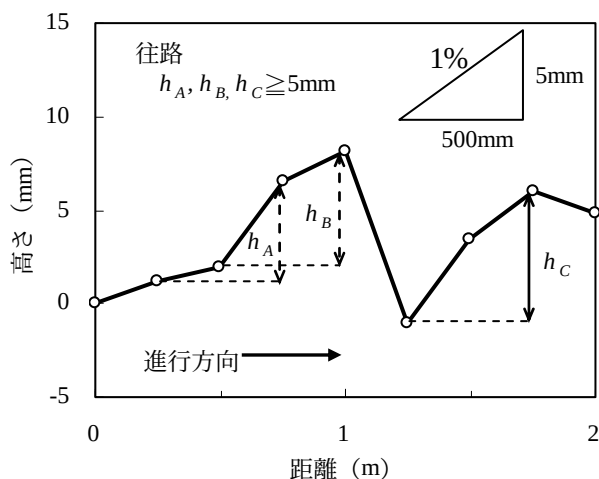


図-8 路面平坦度の算出

(測定区間の縦断勾配 $\geq 0\%$ の場合、0～2mを拡大)

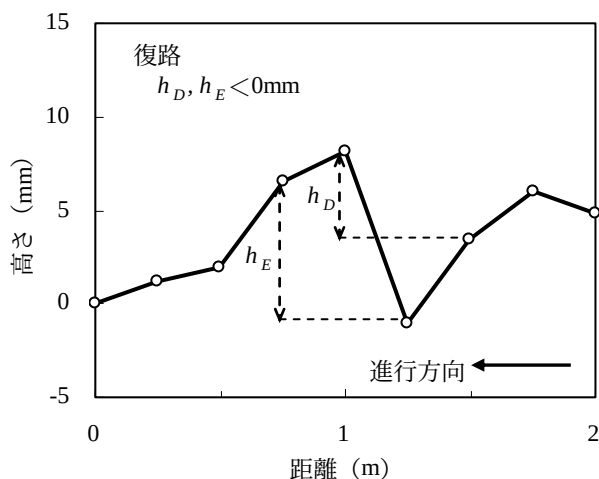


図-9 路面平坦度の算出

(測定区間の縦断勾配 $< 0\%$ の場合、0～2mを拡大)

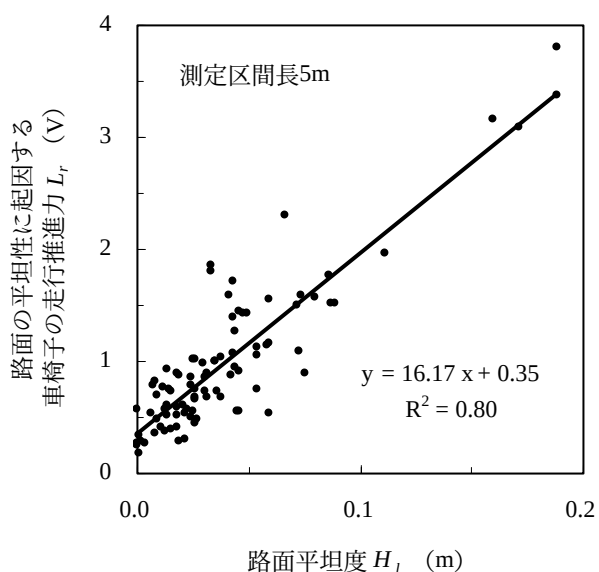


図-10 路面の平坦度と車椅子の走行推進力の関係

4. 結論

本研究では、歩道の平坦性と車椅子走行に要する推進力の関係を検討するために、車椅子を一定速度で走行させたときのトルクを測定する装置を開発した。また、延長5mの歩道において、縦断プロファイルと車椅子走行トルクの測定をおこない、歩道の縦断勾配と車椅子の走行トルクの関係、および歩道の縦断プロファイルから計算される路面の平坦性と車椅子の走行推進力の関係について検討した。

本研究から得られた結論を以下に示す。

- 延長5m、縦断勾配が2～10%の歩道8箇所（往路と復路）において車椅子走行トルク測定を5回実施し、得られたデータを基に本装置の反復性について検討した。その結果、本装置の測定データの約90%が繰返し測定の平均値の $\pm 5\%$ に含まれることが分かった。
- これらの測定区間の始終点高低差（縦断勾配）と車椅子走行トルク測定装置の平均測定電圧の回帰式を求めた。回帰式の R^2 値は非常に高いことから、測定区間の始終点高低差（縦断勾配）から本装置の平均走行トルクを推定できることが分かった。
- 車椅子走行トルク測定装置の測定データから路面の平坦性によってもたらされる車椅子の走行推進力を算出する方法、および車椅子の走行推進力に影響を及ぼす路面の平坦度を歩道の縦断プロファイルから求める方法を示した。
- 札幌市手稲区の住宅街の歩道45箇所（延長5m）において縦断プロファイルおよび車椅子走行トルクの測定を実施し、得られたデータを基に路面の平坦性と車椅子の走行推進力の関係について解析した。本手法によって縦断プロファイルから算出される路面平坦度と車椅子走行推進力の回帰式を求めたところ、 R^2 値が0.80と高い値を示した。

本研究で得られた結果を用いることによって、路面の平坦性に起因する車椅子の走行推進力を定量化すること、および歩道の縦断プロファイルから車椅子の走行推進力を推定することが可能である。しかしながら、本研究では、測定区間長が5mの場合しか検討していないことから、歩道の延長が5m以上の場合における車椅子の走行推進力の推定方法について今後検討する必要がある。また、本手法によって求められる車椅子の走行推進力と車椅子利用者が感じる負担度（つらさ）の関係を車椅子利用者によ

る官能試験を通して明らかにし、車椅子利用者の評価に基づいた歩道路面の平坦性評価方法を確立する予定である。

謝辞：本研究は、平成15年度科学研究助成金（課題番号：15360326、研究代表者：苫米地司北海道工業大学教授）の助成を受けました。また、研究を行うにあたり、札幌市建設局道路維持部維持課および道路工業株式会社に多大なご協力を頂いたとともに、測定および解析に関しては緒形大輔氏、北川由典氏、山本翔太氏、横濱圭一氏のご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、歩行者系道路舗装，pp.172-174，2001.
- 2) 国土技術センター：バリアフリー歩行空間ネットワーク形成の手引き，大成出版社，2001.
- 3) 国土交通省：国土交通白書，2001.
- 4) 国土交通省道路局：歩道における段差及び勾配等に関する基準，2002.
- 5) 石田真二，亀山修一，福原敏彦，笠原篤：逐次2角法を用いた小型プロファイルによる歩道の平坦性測定，舗装工学論文集，Vol.7，2002.
- 6) Shinji Ishida, Shuichi Kameyama, Toshihiko Fukuhara and Koichi Suzuki: Measurement of Sidewalk Profile Using Portable Profilers Developed in Japan, SURF2004, 2004.
- 7) 横山哲，清水浩志郎，木村一裕：縦断勾配が車いす走行に与える影響に関する研究，土木学会論文集，No.611/IV-42，pp.21-32，1999.
- 8) 牧恒雄，竹内康，松田誠：舗装の凹凸評価法に関する研究，舗装工学論文集，Vol.1，pp.151-158，1996.
- 9) 土屋伸一，古川容子，宮野義康，吉田直之，長谷見雄二：群集歩行行動における高齢者・身体障害者の影響（その4）－車椅子使用者を含む群集流動特性－，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.165-168，2002.

(2004. 6. 30 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN SIDEWALK EVENNESS AND WHEELCHAIR TRAVELING LOAD

Shinji ISHIDA, Shuichi KAMEYAMA, Shinichirou KAWABATA,
Kenji HIMENO and Shigeru KASHIMA

A difference in level, incline and cross slope on sidewalks are serious barriers for aged and physically handicapped persons. However, even if they are small, roughness of sidewalk would increase wheelchair traveling load in case of rough sidewalk.

In this study, measurements of longitudinal profile and torque of wheelchair traveling at a constant speed were conducted at 5m length test sections on steep and rough sidewalks. The relationship between the longitudinal profile and the wheelchair traveling load was also analyzed. It was found that the wheelchair traveling load caused by roughness could be estimated from the longitudinal profile.