車椅子使用者の坂路環境及び活動量の評価と、バリアに対応した車椅子機構に関する研究

中村俊哉　奥田一郎　赤澤康史

1　はじめに

日常生活を快適に営み、ひいてはまちへ出て社会参加を行うためには、一定の移動能力を有していることが重要となる。移動能力の維持・向上には適切な運動が必要となるが、ひとたび移動能力の低下が生じると移動能力が低下したことで生じる転倒リスクや不便な事柄の増加から外出意欲も低下し、その結果、移動能力の更なる低下が生じるという悪循環を招いてしまう。外出意欲の低下は、地域コミュニティとの交流等の社会参加の機会を減少させる要因となるため、移動能力の維持・向上は地域コミュニティの維持にも重要である。

移動能力は本人の身体的要因だけでなく、環境や移動のために用いる用具や機器の影響を受ける。そのため､居住地域の環境整備や適切な用具の使用により移動能力を維持･向上することが望ましいと言える。

本研究ではこの５年間､「車椅子使用者の坂路環境及び活動量の評価と、バリアに対応した車椅子機構に関する研究」と題して、坂路環境の特に降下に着目し､「車椅子用身体活動量計の開発」､「道路傾斜面と車椅子の降下に必要なブレーキ力の検証」､「介助者の負担を軽減する新たな介助用車椅子の開発」の３つの研究を行ってきたので報告する。

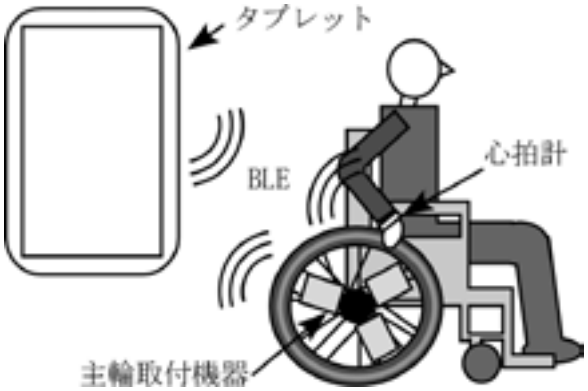
2　車椅子用身体活動量計の開発

平成 27 年から平成 28 年にかけて、車椅子用身体活動量計を開発し、実際の車椅子使用者の日常生活における活動量を数値化、車椅子使用者が健康を維持するために必要な指標を作成することを目的として研究を行った。

2.1 車椅子用身体活動量計の概要

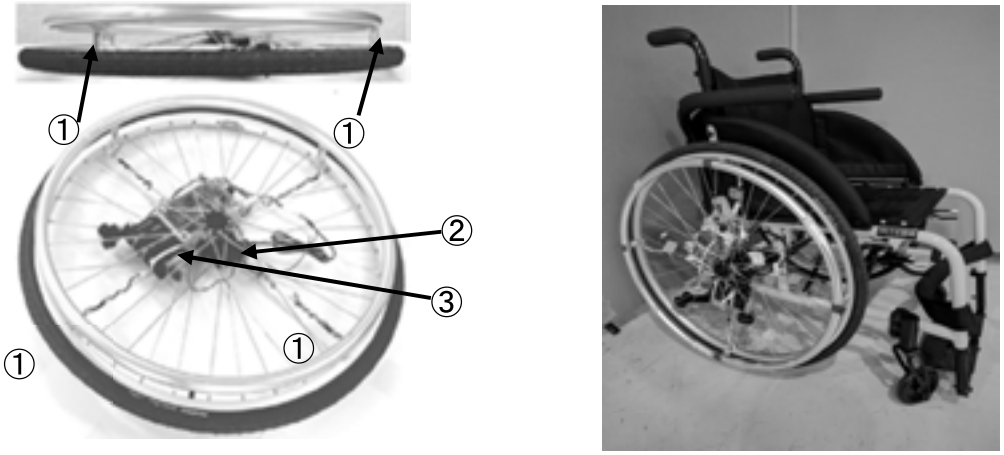
実際の車椅子使用者の日常生活における活動量を計測するために、車椅子を駆動する際や制動する際のトルクの計測が可能な車椅子(以下､計測用車椅子)の開発を行った｡計測用車椅子は一般的な車椅子(MS-II,日進医療機器)をベースとした。車重は 12kg であり、直径 0.6m のアルミ製のリムと 36 本のスポークで組み上げられたクイックリリース方式のホイールとアルミ製のハンドリムを使用している。

図 1 に開発した車椅子用身体活動量計の全体像と各機器の役割を示す。



計測機器	計測情報
タブレット	GPS による位置情報 タブレット周囲の温度
心拍計	車椅子使用者の心拍数
主輪取付用機器	回転速度 車椅子の駆動力（トルク）

図１　開発した車椅子用身体活動量計の全体像と各機器の役割



①歪みゲージ　：ハンドリム取付部（爪部）に取り付けることで、ハンドリムにかかる力を計測
②加速度センサ：車輪に取り付けることで、車輪の回転数や車椅子の速度を計測
③バッテリ　　：モバイルバッテリを使用し、一般的な車椅子操作なら８時間連続で計測が可能

図２　計測用車椅子の計測装置を内蔵したホイール（左）とそのホイールを取り付けた車椅子（右）

車輪の回転数やハンドリムにかかる駆動力・制動力の計測装置については、バッテリと合わせ駆動輪に内蔵されていることから、クイックリリース方式で 22 インチの駆動輪を有する車椅子であれば、駆動輪を交換することで使用中の車椅子による計測が可能である。

計測用車椅子では、２軸直交のひずみゲージ(KFG -1-350-D16-23,共和電業)を用いて、ハンドリムを漕いだときに、ハンドリム取付部（爪部）に生じる歪みからトルクを計測する。爪部毎に４ゲージ法によるブリッジ回路を構成し、並列接続で 1 つのひずみアンプ(M11-0035,共和電業)に入力することで各爪部の平均的な歪みを求めている。図２に示す計測用車椅子のホイールは、通常のホイールと同等の体積(外形)に収まるように、計測装置がホイール内部に取り付けられている。その計測装置の構成要素は、モバイルバッテリ(ARMOR 6000mAh, DXPOWER)と３軸の加速度および角速度センサを内蔵したデータロガー(MVP-RF8-HC-2000,マイクロストーン)である。

この計測用車椅子は一般的な条件下での車椅子操作であれは８時間以上の連続計測が可能であるため、日中を通しての身体活動の計測が可能である。なお計測用車椅子を含む身体活動量計の重さは、タブレットが 300g、心拍計が 30g、計測用ハンドリムを除く駆動輪に取付を行った機器が両輪で約 1.6kg である。これらの計測にかかる機器の重量の合計は、一般的なモジュール型車椅子本体の重量の 10%程度となっている。

なお、身体活動量計を用い健常者で計測が可能であることを確認した後、実際の車椅子使用者の生活の中で計測を行う準備を行っていた。しかし、車椅子使用者が健康を維持するために必要な指標を明らかにするための統計的に妥当な被験者数を身体機能毎に集めることが困難なことから、車椅子身体活動量計としての開発を中止し、車椅子使用者による計測は行わなかった。今回開発した車椅子身体活動量計については、後で述べる２つのサブテーマを実施するための基礎データを取得するための計測機器として用いることとした。

3　道路傾斜面と車椅子の降下に必要なブレーキ力の検証

車椅子で坂路を降下する際、自走用手動型車椅子の場合はハンドリムに手で摩擦をかけ減速するのが一般的である。また、介助により車椅子の走行操作を行う場合は、介助者が体重を後方に残しながら介助用のブレーキを操作しつつ降下する必要があり、高齢の介助者にとって簡単な操作ではない。もし、車椅子で坂路を降下する際に十分にブレーキ操作が行えない場合、車椅子が暴走する恐れがあり、非常に危険である。このことから、坂路の傾斜角と車椅子の降下に必要なブレーキトルクの関係を明らかにし、そのデータから坂路における車椅子の降下時の安全性に関する指標を作成することを目的とし平成 27 年より研究を実施した。

3.1 計測用車椅子を用いたの降坂実験

前章で開発した計測用車椅子を活用し、車椅子の降坂時のブレーキトルクの計測実験を実施した。

以下の条件(1)(2)で制動トルクおよび車輪の角速度を計測した。図３に条件(a)(b)(c)による実験の様子を示す。各計測条件は 条件(a) 勾配 1/20 と 1/12 で全長６m、幅１m の木製路面のスロープ、条件(b) 勾配 1/15、1/12、1/10、1/8、1/6 に調整可能な全長５m、幅１m の樹脂路面のスロープを用いた。本研究所で開発した計測用車椅子（重量 12.5kg）を使用し、条件(a)では体重 82.5kg の男性が被験者になり、さらに重量 20kg の錘を被験者の上半身に取り付け、総重量 95kg および 115 kg で計測した。条件(b)では、条件(a)の被験者に追加して体重 52.5kg の男性が乗車し、総重量 65kg、95kg および 115kg で計測した。さらに条件(c)では、勾配 1/8 の敷地内の屋外舗装坂路において、体重 82.5kg の男性が被験者となり総重量 95kg で計測した。

実験条件

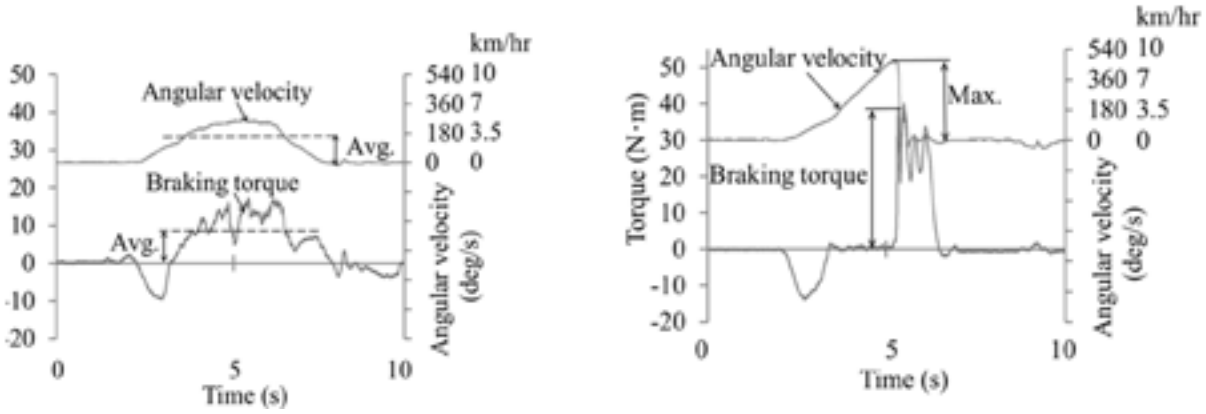
(1) 被験者が両手でハンドリムを握り安全と感じる速度でスロープを下降する。

(2) 被験者がハンドリムから手を離してスロープを下降し，床面の手前でハンドリムを握る急な制動操作で停止する。

図４に条件(b)可変スロープ、総重量 95 kg、勾配 1/8 での計測結果を示す。制動トルクは総重量および勾配の増大に伴い増加、角速度の増大に伴い制動トルクが増加することを確認した。

(a) 木製路面スロープでの実験 (b)可変スロープ（樹脂路面）での実験 (c)屋外舗装坂路での実験

図３ 降坂時のブレーキトルクの実験の様子



条件(1) 安全と感じる速度に減速　　条件(2) 急な制動操作で停止

図４ 降坂時のブレーキトルクの計測波形の例

3.2 制動トルクのシミュレーションと実測値との比較

降坂時のブレーキトルクについて、力学モデル（シミュレーションモデル）を検討した。検討を行ったシミュレーションモデルに対し、3.1 節で実測した加速度のデータを用いて、実際のトルクとシミュレーションモデルの計算値との比較検証を行った。その結果、実測値とシミュレーションモデルによる計算値について概ね同じ傾向が確認された。

3.3 ブレーキ力検証用車椅子の検討

今回得られた知見を踏まえブレーキ力を検証するための車椅子（ブレーキ力検証用車椅子）を製作した。

図５に製作したブレーキ力検証用車椅子（左）とシステム構成（右）を示す。ブレーキ力検証用車椅子の製作は、車椅子の介助用ブレーキレバーを電動アクチュエータにより操作することで、坂路の傾斜角や速度に対してシミュレーションモデルにより得られたブレーキ力を働かせ、想定される車椅子の挙動が実現できるか検証を行うことを目的としている。

介助用ブレーキ付きの手動車椅子（ハンドリム直径 0.5 m, 車輪直径 0.6 m）に電動アクチュエータ（SMC, LEYG32）を取り付け、この電動アクチュエータのロッドの移動により介助用ブレーキのブレーキレバーを操作できるようにした。 このブレーキ力検証用車椅子を用いて実際にスロープでの走行実験を行い、制動力対して想定した速度への減速を確認した。

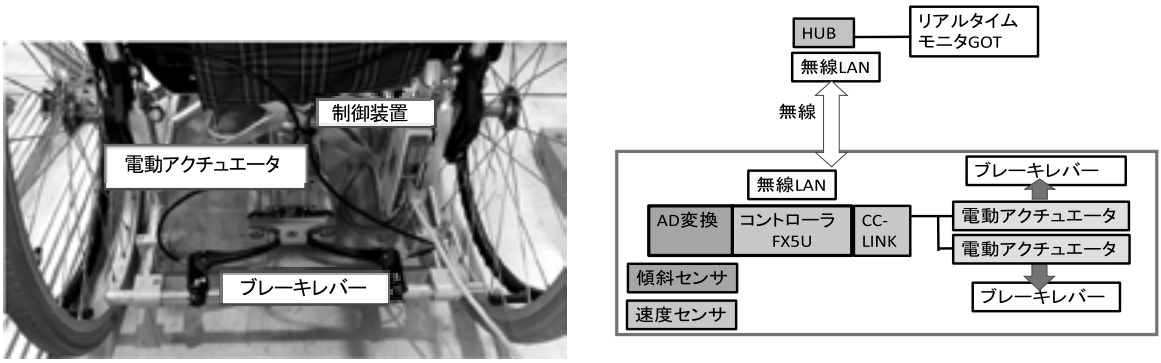


図５ブレーキ力検証用車椅子（左）とシステム構成（右）

3.4 駆動トルク計測用ローラ台の製作

本研究の計測データの一部を用いて、車椅子の評価を目的とした車椅子評価用のトルク計測が可能なローラ台（駆動トルク計測用ローラ台）を製作した。計測用車椅子を駆動トルク計測用ローラ台に載せた様子を図６に示す。

図６ 駆動トルク計測用ローラ台に載せた計測用

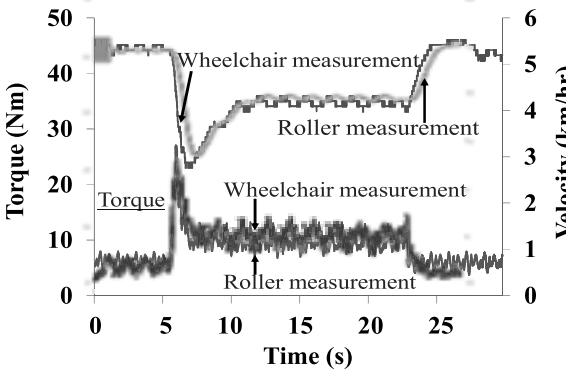


図７ 計測用車椅子と駆動トルク計測用ローラ台による計測値の比較

この駆動トルク計測用ローラ台は車椅子を駆動した際の車椅子乗車者が発揮した駆動トルクを計測できる。更には坂路の降下を想定し、ローラをモータにより回転させた状態で駆動や制動させた際の車椅子乗車者が発揮しているトルクを計測することができる。

この駆動トルク計測用ローラ台に計測用車椅子を載せ、駆動トルク計測用ローラ台のローラをモータにより回転させた状態で、計測用車椅子に乗る被験者がハンドリムを制動操作したときのトルクと角速度を計測した。データを図７に示す。このデータから、駆動トルク計測用ローラ台を用いれば実際に坂道を降

下することなく、被験者が普段使用している車椅子で制動トルクの計測が行えることを確認した。

４　介助者の負担を軽減する新たな介助用車椅子の開発

車椅子で坂路を降下する際、手動型車椅子の場合はハンドリムに手で摩擦をかけ減速するのが一般的である。しかし車椅子乗車者の腕や手の力が弱い場合、ハンドリム操作による減速が困難である。特に駆動を効率良く行うために、摩擦が大きいゴム等で皮膜したハンドリムや波型の樹脂製ハンドリムを使用している場合はより一層スムーズな減速操作が困難である。また、介助により車椅子を操作する場合は、介助者が体重を後方に残しながら、介助用のブレーキレバーを握るなどの操作をしつつ降下する必要があり、車椅子乗車者の体重が介助者に比べて著しく大きい場合は、さらに操作が困難となる。このことから、平成 28 年度より、下り坂で安全に降下することができるブレーキシステムの開発を行った。

4.1 市場動向とニーズ

当初は、介助型手動車椅子用の速度抑制機能を有したブレーキ機構の開発を目指していたが、介助型手動車椅子用の速度抑制機能を有したブレーキ機構の開発を中止し、介助用アシスト電動車椅子の開発へ移行した。改めて介助用アシスト電動車椅子に関しての有効性についてアンケートを実施した。

アンケートは、在宅や屋外での車椅子の介助を行うことが多いと思われる訪問介護・居宅介護事業所に所属するセラピストやナースを中心に 80 人に配布し、62 人より回答を得た。

全回答者に対する「降坂時に速度が出すぎない仕組みのついた車椅子があれば使用を検討しますか？」との問に、検討する 40 人、検討しない３人、わからない７人、無回答 12 人となった。同様に「登坂時に軽く押せるアシスト機能のついた車椅子があれば使用を検討しますか？」との問に、検討する 45 人、検討しない 3 人、わからない 3 人、無回答 11 人であった。

なお、屋外で車椅子を使用する方のうち坂道や斜面で車椅子を押すことがある方 25 人について、「降坂時に速度が出すぎない仕組みのついた車椅子があれば使用を検討しますか？」との問に、検討する 19 人、検討しない２人、わからない４人となった。同様に「登坂時に軽く押せるアシスト機能のついた車椅子があれば使用を検討しますか？」との問に、検討する 21 人、検討しない 2 人、わからない 1 人、無回答 1 人であった。

この結果からも、全回答者に比べ坂道や斜面で車椅子を押すことのある方は、坂路での制動または駆動のアシストに関し何らかの必要性を感じていると考えられる。これらから、検討を行っている介助用アシスト電動車椅子について、市場ではニーズがあると思われる。

4.2 ブレーキ機構を搭載した車輪を用いた機能試作の製作

介助用車椅子に減速機能を持たせた機能試作の仕様検討と製作を行った。ここでは、ブレーキ機構を有する車輪を補助輪とし、介助用車椅子に最初から搭載されている主輪と併用することとした。併用することで、実験時に補助輪の車軸等が破損した場合においても安全に走行が可能である。

製作した介助用車椅子にマネキン（錘を含め 80 kg）を乗せ、実験室内のスロープ（1/20, 1/12）を降下し安全に減速することを確認した。ブレーキ無しの車椅子では、車椅子の速度を制御するために、介助者が後方に重心を残した状態で降下しているため、ブレーキ作動時と比較して、介助者と車椅子の距離が遠く、歩幅が広くなっている。

4.3 降坂時の速度の検証

介助型電動車椅子の仕様を決めるにあたり、降坂時の速度を検証する必要があり平成 29 年度に実験を実施した。介助用手動車椅子による降坂時の速度については、介助による坂路の下降は、1/20 勾配及び 1/12 勾配のいずれにおいても、比較した速度が 1.5～3.5km/h となった。1/20 勾配においては、比較した速度が最も低かった 1 名を除くと、比較した速度が 2.0～3.5km/h となった。1/12 勾配おいては、比較した速度が 1.5.～3.0km/h となった。これらの実験データの検証を目的に改めて先行文献の調査を行った。

能登らの論文 [1] では概ね平均降下速度が、1/25～1/6 勾配の間で、秒速 40cm（時速 1.44 km）～秒速

60cm（時速 2.16 km）に収まっており、また徳田らの論文[2]においても、1/20 勾配時に平均降下速度が秒速 0.92 m（時速 3.31km）、1/14 勾配時に秒速 0.84 m（時速 3.02 km）と一般的に平均的な歩行速度といわれる時速 4 km を超えない数字となった。これらの研究からも、実験データの妥当性が確認された。

4.4 介助用アシスト電動車椅子の開発

介助用アシスト電動車椅子として、本研究での知見を生かした開発を行いたいと企業よりの申し出があり、企業との介助用アシスト電動車椅子の共同開発開始に向け調整を行った。

本研究で計測した、降坂時の速度やブレーキ力、先行文献等から、開発する介助用アシスト電動車椅子の仕様を検討し、企業にて試作機を製作した。この試作機を用いて、評価実験を行った。この評価実験では、当研究所に所属する車椅子の扱いになれた職員 3 名により、屋内の可変スロープ（1/12,1/8,1/6）段差（1.5cm,3.0cm,6.0cm）等で評価走行を実施した。また、あわせて屋外の未舗装路、コンクリート舗装されている車路等での評価実験を行った。現在、企業で機器の改良等の検討を行っているところである。

５　おわりに

「車椅子使用者の坂路環境及び活動量の評価と、バリアに対応した車椅子機構に関する研究」として５年計画で「車椅子用身体活動量計の開発」「道路傾斜面と車椅子の降下に必要なブレーキ力の検証」及び「介助者の負担を軽減する新たな介助用車椅子の開発」の３つのサブテーマを実施した。

「車椅子用身体活動量計の開発」では、車椅子用身体活動量計を開発し、開発した計測器を用いて車椅子使用者の運動の指標をつくることを目的としていた。しかし、指標を作成するにあたり身体機能毎の被験者を十分に集めることができないことから指標の作成は中止した。ただし、本研究で開発した計測装置は、その他の２つのサブテーマの計測に活用した。

「道路傾斜面と車椅子の降下に必要なブレーキ力の検証」では、坂路と車椅子の降下時に必要なブレーキトルクの関係を明らかにする実験を行った後、得られたデータから坂路における車椅子の降下時の安全性に関する関係式（シミュレーションモデル）を求めることができた。また、車椅子に計測器を取り付けることなく、車椅子の走行に必要な駆動トルクや制動トルクの計測が可能な駆動トルク計測用ローラ台の製作も行った。この駆動トルク計測用ローラ台のローラを電動モータで回転させることで、坂路降坂時のブレーキトルクの計測を行えることを確認した。

「介助者の負担を軽減する新たな介助用車椅子の開発」では、その他２つのサブテーマで実施した研究の知見を用い、手動式車椅子において降坂時に速度抑制を行う、新たな制動機構の開発を目指し研究を実施した。当初は介助用手動式車椅子に搭載する速度抑制機能を有したブレーキの開発を目指していたが、介助用アシスト電動車椅子として、本研究での知見を生かした開発を行いたいとの企業より申し出が有り、企業との共同による介助用アシスト式電動車椅子の開発へつながった。

参考文献

1)　能登裕子・村木里志:乗車者および介助者を考慮したスロープ勾配と車いす昇降介助操作方法に関する検討―車いす走行動態と介助負担および主観的乗り心地について―, pp. 55-66, 日本看護技術学会誌 Vol. 9, No. 2, 2010

2)　徳田良英:車いすの下り勾配における身体負担に関する実験研究, pp. 40-47, 福祉のまちづくり研究, Vol. 11, No. 1, 2009