

高齢者・障害者の移動機器の最適処方に関する研究開発

- 手動車いすの縦断勾配における走行特性と操作性に関する定量的評価 -

Research on Assistive Devices of Mobility for Aged and Disabled People

- Quantitative Evaluation of Characteristics of Running on Ramp and Maneuverability of Manual Wheelchair -

米田郁夫 糟谷佐紀 金井謙介 浅和 貴

YONEDA Ikuo, KASUYA Saki, KANAI Kensuke, ASAWA Takashi

篠山潤一 山本直樹 岡野生也 安田孝司(リハビリ療法部)

SASAYAMA Junichi, YAMAMOTO Naoki, OKANO Ikuya, YASUDA Takashi (Hyogo Rehabilitation Center)

キーワード:

車いす、計測・評価、解析

Keywords:

Wheelchair, Measuring and evaluation, Analysis

Abstract:

We evaluated the influences of ascending hill on operating the wheelchair qualitatively, using the special wheelchair equipped with torque meters and rotary encoders on driving wheels. We calculated momentum needed to travel 1 meter for evaluating the difficulty of operating the wheelchair. And, it was found that the slower the wheelchair ascends hills, the more momentum needed. It means that the weaker the wheelchair user is, the more momentum he/she must spend to negotiate the hills.

We also evaluated the maneuverability of the wheelchair with changing the heights of the handrims variously, for two cervical cord injured male persons (C5 & C6) and a normal female person. The result is, when handrims were set in the way that the user can reach their hands on the top of the handrims flexing their elbows by 100 degrees, they could be operated most easily.

1 はじめに

本研究は、客観的なデータをもとに、移動補助用具とくに車いすを可能な限り楽に使えるようにするための要因を明らかにしようというものである。つまり、車いすを設計、処方し、使用環境を整備するための合理的な手法を明らかにすることを目的としている。

車いすを使いやすくするには、車いすの走行効率の向上、環境の整備、使用者の身体条件と車いすとの適合といったことを追求する必要がある。昨年度は、路面環境が車いす走行に及ぼす影響と車いすの車輪アライメントが走行効率に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、そのメカニズムについて考察した¹⁾。

今年度は、車いす使用者に対して負担を強いる環境要因であるスロープ(縦断勾配)の影響について定量的評価を行った。また、使用者と車いすの適合性については、ハンドリムと使用者の相対的位置による操作性の違いに関する定量的評価を行った。実験では駆動輪にトルク変換器(駆動力の計測)とロータリエンコーダ(駆動輪回転数の計測)を装備した計測用車いすを使用した。

2 スロープ走行試験

スロープが車いす走行において使用者にどの程度負担を強いるかを調べるための走行試験を行った。

2.1 走行試験概要

(1) 試験走行路

実験室内に、縦断勾配を可変にできる走行路（図1）を設置した。走行路のスロープ部分の有効寸法は、幅員0.9m、長さ3mである。スロープ路面は平坦なジュラルミン板で作られており、表面に滑り止めシートが貼られている。

今回の走行試験では、スロープ勾配を、1/20、1/15、1/12、1/10、1/8、1/6の6通りに設定した。

(2) 被験者

スロープ勾配が車いす走行に及ぼす物理的な影響を把握することに視点を置くため、被験者は以下に示す健常者2名とした。

被験者 Ks：健常女性（33歳、体重480N）

被験者 Yi：健常男性（54歳、体重725N）

(3) 試験走行内容

直進走行：

被験者は、計測用車いすに乗車し、ハンドリムを操作しながらスロープ路面上を直進走行する。各勾配につきいろいろな速度で計7回走行する。

1ストローク走行：

被験者は、計測用車いすに乗車し、ハンドリムを1ストローク分だけ操作してスロープ路面上で車いすを直進走行させる。ただし、車いすの初期位置は前後輪すべてがスロープ上に乗るように設定する。そのため、被験者がハンドリムを漕ぎ出す前に車いすが後退しないよう、介添者が前進方向に力を加えることなく車いす後方を支えておく。



図1 勾配可変試験走行路
Fig.1 Slope track for test running

2.2 スロープ走行試験結果と考察

2.2.1 負担率

計測用車いすでスロープ上を直進走行したときのトルク、走行距離パターンの一例を図2に示す。車いす走行時の負担を定量的に評価するために、昨年度と同様負担率を計算する。すなわち、ハンドリムに加える駆動力（トルクをハンドリム半径で除す）

を時間で積分して求めることができる運動量を、車いすを走行させるための負担量とし、走行した距離を労力で除した値、つまり1m走行するのに要する負担量を負担率と定義する。

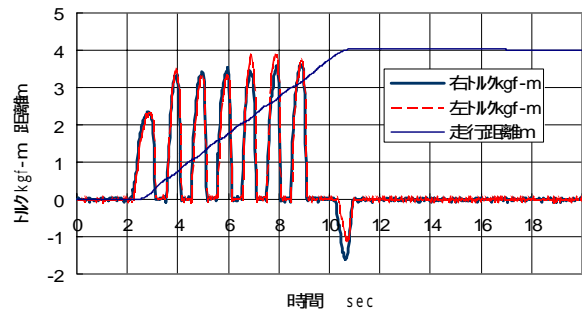
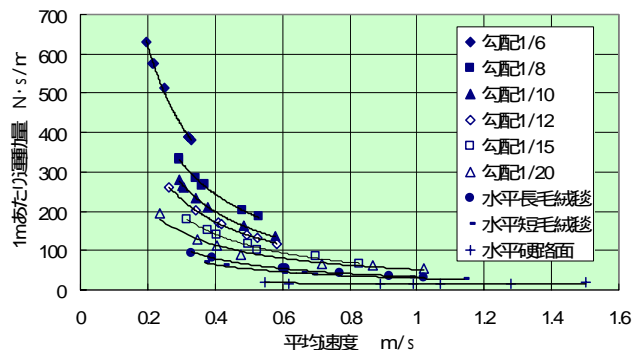
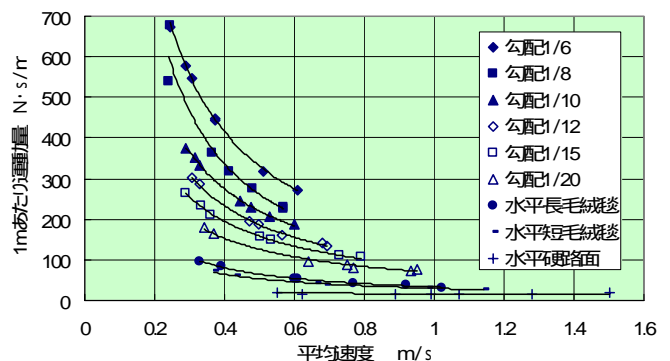


図2 スロープ路面走行データ例
Fig.2 Example of data wheelchair ascending hill

各試験走行データから負担率を算出し、平均速度を横軸にしてグラフにまとめたものを図3に示す。比較のために、昨年度算出した各種水平路面（硬路面、短毛絨毯路面、長毛絨毯路面）における負担率も示している。



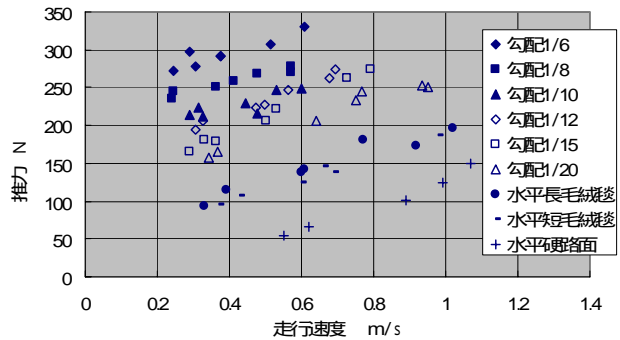
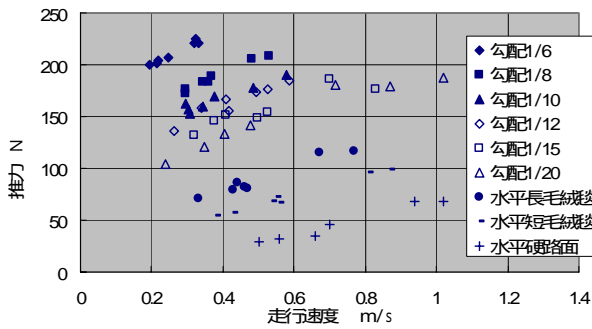
(a)被験者 Ks (subject Ks)



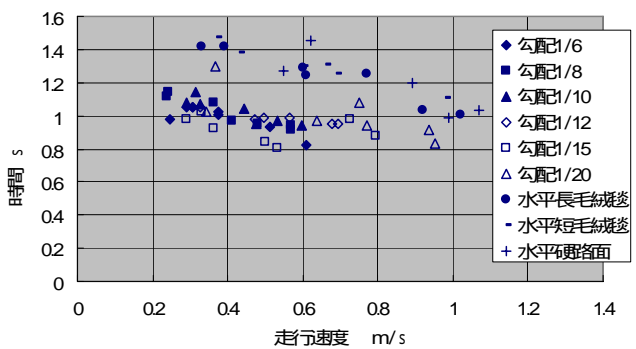
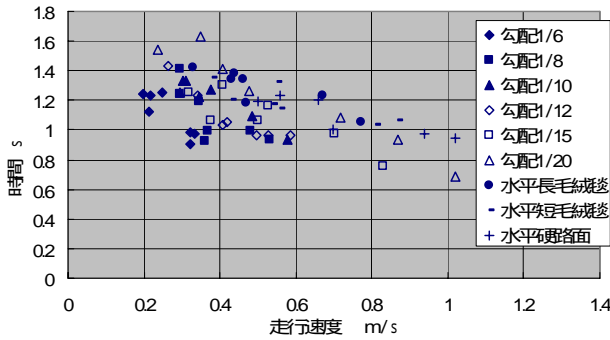
(b)被験者 Yi (subject Yi)

図3 スロープおよび水平路面走行時の負担率
Fig.3 Momentum needed to ascend 1m on the hill and on the level road

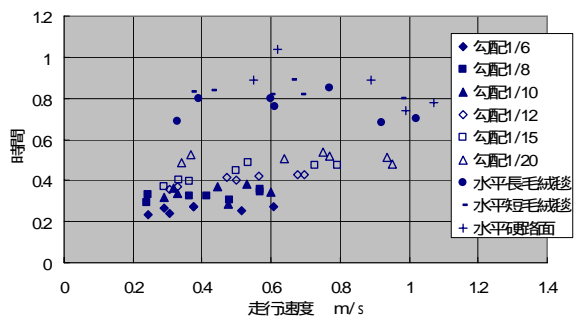
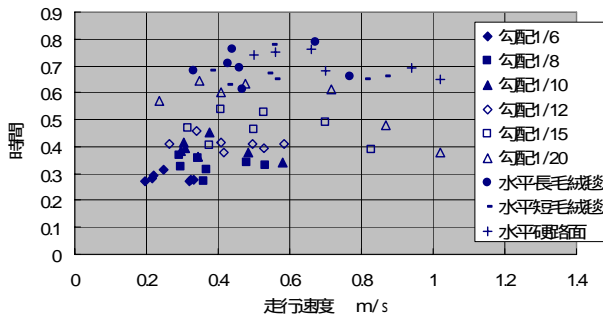
駆動力ピーク値
(speed – driving peak force)



走行速度と駆動周期
(speed – stroke cycle time)



走行速度と惰走期時間
speed – inertial running time



(a)被験者 Ks (subject Ks)

(b)被験者 Yi (subject Yi)

図4 スロープ路面における走行パターン
Fig.4 Operating pattern of running on the hill

昨年度の結果から、走行抵抗が比較的大きい絨毯路面においては、走行速度が小さいと負担率が大きくなる事が明らかになっている。図3から明らかのように、スロープ路面における走行においても、どの勾配についても走行速度小さいと負担率は大きくなる。そして、その傾向は勾配が急峻なほど大きくなっている。このことから、スロープは、力が弱く走行速度を大きくすることがむずかしい車いす使用者には大きな負担になることが想像できる。

2.2.2 操作パターン

図4は、各走行について、駆動力ピーク値、駆動周期、惰走時間の平均値を求め、走行速度を横軸にグラフにしたものである。駆動力ピーク値については、平地走行、スロープ走行いずれにおいても、走行速度に比例して大きくなっている。

しかし、駆動周期と惰走時間については、平地走行とスロープ走行ではパターンが異なっている。スロープ路面においては、平地路面に比べて惰走時間

および駆動周期が短い。また、平地路面においては、走行速度が小さくなるに伴って惰走時間と駆動周期が長くなっているが、スロープ路面においては、走行速度が小さくなると惰走時間が短くなり、駆動周期は走行速度に関係なくほぼ一定である。

スロープ路面では、速度が保たれていないと、車いすが後退してしまう。そのため、走行速度にかかわらず駆動周期を短くして走行速度を保つ必要がある。また、走行速度が小さいと、惰走期において速度がゼロになる時間が早くなる。そのため、走行速度が小さい場合は惰走時間をより短くする操作パターンにする必要がある。

2.2.3 勾配抵抗

水平路面における走行抵抗(主として転がり抵抗)は、単に車いすの走行を阻止しようとする力であるのに対し、スロープ路面における走行抵抗は、転がり抵抗だけでなく、重力による走行抵抗も加わる。重力による走行抵抗は、車いすが走行しているか否かにかかわらず常に作用しているものである。したがって、重力による走行抵抗に打ち勝つ力を加えなければ、車いすはスロープ路面を転がり落ちてしまう。そこで、スロープ路面における走行抵抗をとくに「勾配抵抗」と称することにする。

スロープ路面における勾配抵抗を定量的に評価するために、1ストローク走行試験を行った。

図5は、スロープ路面における1ストローク走行時のデータの一例である。ハンドリムに駆動力が加わっている間(駆動期)車いすは加速されて前進し、ハンドリムから手が離れた瞬間から(惰走期)惰走、減速しながらやがて速度がゼロになり、ハンドリムに推進力が加わらない状態が続けば車いすは後退する。

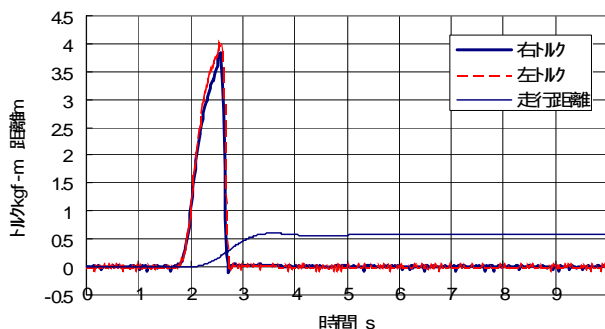


図5 スロープ路面での1ストローク走行データ例
Fig.5 Example of data wheelchair ascending hill by 1 stroke

2.2.4 整次多項式回帰分析による勾配抵抗の同定

惰走期においては、車いすには勾配抵抗のみが作用していると考えてよい。したがって、惰走期にお

ける車いすの動きを方程式で表すことができれば、勾配抵抗を同定できる可能性がある。

勾配抵抗はスロープ勾配によって一定値であることが予測される。つまり、車いす走行距離 x を時間 t としたとき、式(1)のような2次関数で表されることが予測される。

$$x = a t^2 + b t + c \quad \dots (1)$$

一例として、被験者Bの勾配1/12において1ストローク走行したときのデータの中から、惰走期における時間-走行距離データを切り出し、整次(2次元)多項式回帰分析(危険率1%)により各係数を求めると式(2)を得た。

$$x = -0.450 t^2 + 3.202 t - 5.091 \quad \dots (2)$$

このときの $p = 1.31 \times 10^{-59}$ であった。したがって、惰走期における走行距離-時間の関係は式(1)のような2次方程式で表せると言うて良い。試験走行データと式(2)を比較すると図6のようになる。データと方程式は一致しているとみなして良い。

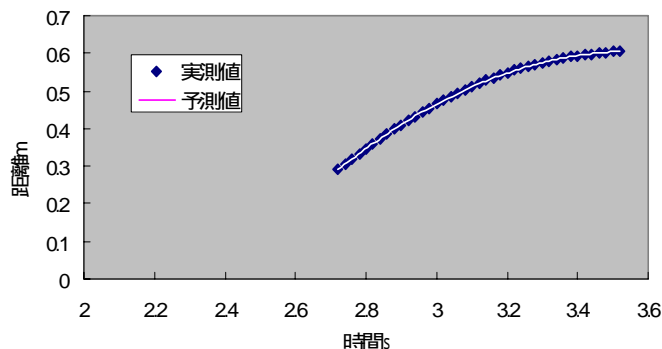


図6 2次元整次多項式回帰分析による惰走期運動軌跡の同定

Fig.6 Identification of track at the inertial running by polynomial regression

ここで、式(2)を微分すると式(3)を得る。

$$dx/dt = -0.90 t + 3.202 \quad \dots (3)$$

さらに、式(3)を微分すると式(4)を得る。

$$d^2x/dt^2 = -0.90 \quad \dots (4)$$

式(3)は惰走期開始時の車いすの速度(以下、惰走初速度と称す)を表している。なお、式(2)で表される試験走行における惰走期の開始時間は2.72sであったので、その値を式(3)に代入すると0.754を得る。つまり、惰走初速度は0.754m/sである。

式(4)は惰走期における加速度を表している。つまりこの場合の加速度は -0.90m/s^2 である。加速度の値が負であるので、車いすは走行しているか否かにかかわらず常に後退させる力が作用していることになる。この力は勾配抵抗とみなすことができる。

このように、2次多項式回帰分析により惰走初速

度とスロープにおける勾配抵抗を同定することができる。

被験者 Ks および Yi のスロープ走行すべてについて、惰走初速度と勾配抵抗を求め、惰走初速度を横軸にしてグラフにすると図7のようになる。

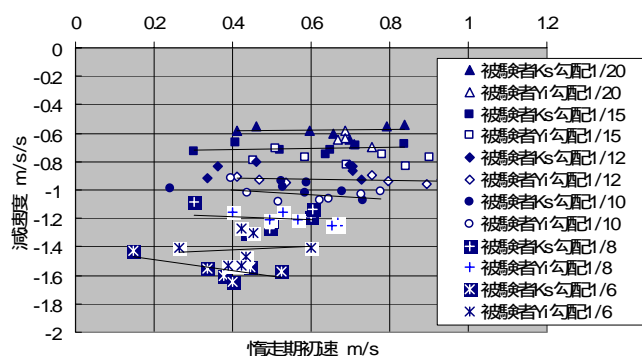


図7 惰走初速度と勾配抵抗
Fig.7 Initial speed – deceleration at inertial running phase

図7から、勾配抵抗は、惰走初速度とは相関がなく、また、被験者間での違いはないと言える。当然のことであるが、スロープ勾配が急峻になるほど勾配抵抗は大きくなっている。

3 車いす適合性に関する実験と評価

車いす使用者にとって、車いすを楽に操作できるか否かは重要な問題である。R.A.Cooper は車いすが楽に操作できないと、長期間使用の結果として肩痛、頸痛などの2次障害が生ずるリスクが大きくなることを指摘している²⁾。

車いすを楽に操作できるか否かに影響する要因の1つに使用者の身体に対するハンドリムの相対位置があげられる。そこで、今回は、ハンドリム高さによって操作性がどのように影響するかについて実験を行った。

3.1 実験概要

(1) 被験者

ハンドリム位置が操作性に及ぼす影響は、残存機能が低下している人ほど大きくなると想像される。そこで、今回は、以下に示す頸髄損傷者2名を含む3名について実験データを収集した。

被験者 Ks : 健常女性 (33歳、質量 480N)

被験者 Na : 男性頸損者 (C6b)

被験者 Yo : 男性頸損者 (C5b)

(2) 実験内容

最大駆動力 (等尺性) の計測 :

計測用車いす後方に錘を搭載した櫓を連結する。搭載する錘は車いすが前進しない程度に過重にする。被験者はハンドリムを前進方向に駆動し、そのときの駆動力を計測する。

最大駆動力 (等運動性) の計測 :

被験者の駆動力で車いすがほんのわずかに前進できる程度まで櫓に搭載した錘を減らす。被験者はハンドリムを前進方向に駆動し、そのときの駆動力を計測する。

水平絨毯路面走行の計測 :

実験室内に作った幅 1.8m、長さ 7.2m の絨毯 (毛足 4.5mm ループパイル) 走行路を、楽な駆動力で3回走行し、走行データを収集する。

スロープ走行の計測 :

前章のスロープ走行試験と同じスロープを走行する。その際のトルクおよび駆動輪回転数データを収集すると同時に、操作が「楽」、「少し苦」、「苦」の3段階官能評価を行う。

(3) パラメータ

車いす操作者の身体に対するハンドリム高さを、操作者が車いす座面に着座した状態で、ハンドリム頂点を握ったときの肘屈曲角度で表す (図8)

ハンドリム高さを、肘屈曲角 70°、90°、100° の3通りに設定し、それぞれのハンドリム高さについて上記の実験を行う。

なお、座角については、山本らが行った研究において、頸損者の場合は 10° が適合するという結果が出ている³⁾。したがって、本研究においては、座角は 10° 一定とした。



図8 肘屈曲角によるハンドリム高さの定義
Fig.8 Definition of height of handrim by elbow flexion angle

3.2 適合性実験結果と考察

3.2.1 最大駆動力

被験者3名の最大駆動力 (等尺性および等運動性)

の結果を図9に示す。被験者Ksについては、計測用車いすにおいて肘屈曲角 100° の設定はできなかった。被験者Ksは等尺性駆動力より等運動性駆動力の方が若干大きく、被験者Naおよび被験者Yoの場合は規則性が見られない。そこで、今回は等尺性、等運動性駆動力の大きい方を最大駆動力と定義する。

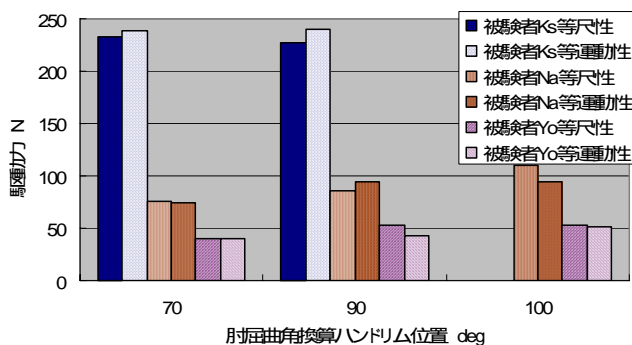


図9 ハンドリム位置と最大駆動力
Fig.9 Peak driving force vs height of handrim

ハンドリム位置による違いを見ると、頸損者の場合、肘角度 70、90、100° の順に最大駆動力が大きくなっている。したがって、今回の頸損の被験者にとっては、ハンドリム頂点接手時の肘角度が 100° になるハンドリム高さが操作しやすい相対位置と結論することができる。

3.2.2 絨毯路面走行

自由走行したときの走行特性を簡単に比較できる事象として速度が考えられる。そこで、まず、各ハンドリム高さについて、絨毯路面を楽に操作しながら3回走行したときの走行速度の平均値を見ている(図10)。

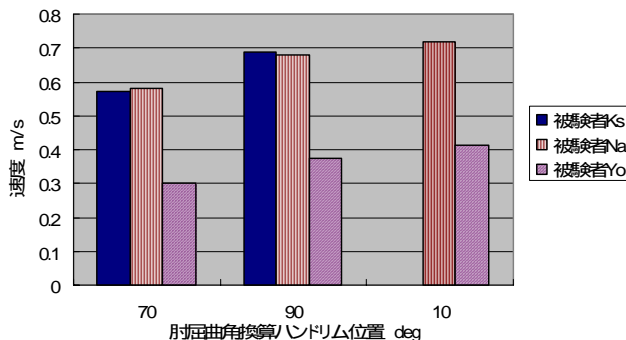


図10 ハンドリム位置と絨毯路面走行時平均速度
Fig.10 Average speed on carpet vs height of handrim

グラフから、各被験者ともハンドリム位置 70°、90°、100° の順に速度を上げて走行していることが分かる。このグラフの傾向は図9のパターンと一致する。このことは、発揮できる駆動力最大値が大

きくなると、それに応じて「楽に操作して走行する」ための駆動力も大きくできると考えられる。各ハンドリム位置での走行時の平均駆動力ピーク値を見ると図11のようになっており、駆動力を大きくして走行速度を上げていることが分かる。

これらのことから、車いすにおいて、ハンドリム位置を適正にして駆動力を発揮しやすくすることの重要性が示唆される。

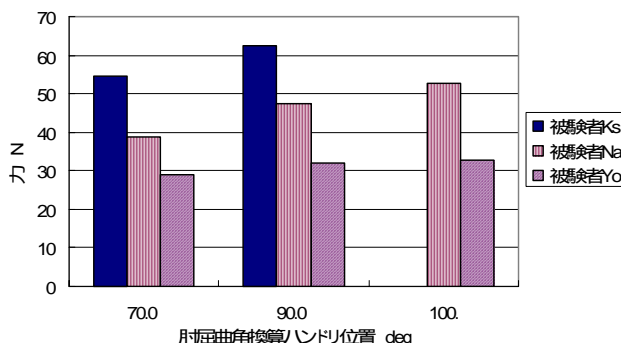


図11 ハンドリム位置と絨毯路面走行時駆動力ピーク値平均

Fig.11 Average peak driving force on the carpet vs height of handrim

3.2.3 スロープ走行

被験者Yoは発揮できる駆動力が小さいため、スロープ走行実験はできなかった。

被験者Aは、肘屈曲角換算ハンドリム位置 70° のとき、勾配 1/6 で、途中で登れなくなった以外はすべての勾配を登ることができた。また、被験者Naは、肘屈曲角換算ハンドリム位置 70°、90°、100° のいずれの場合も、勾配 1/12 において途中で登ることができなかった。

スロープを登るときの被験者Ks、Naの駆動力を図12に示す。途中までしか登れなかった場合は、登れた時点までのデータを示している。

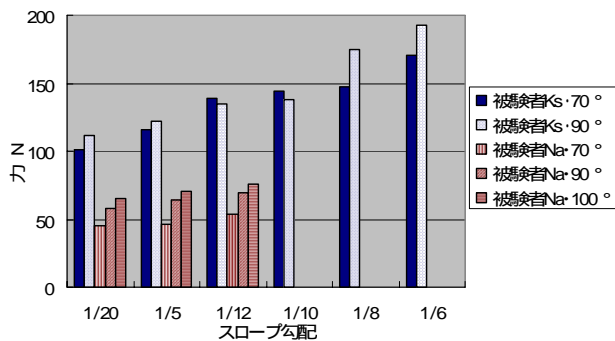


図12 ハンドリム位置とスロープ走行時駆動力ピーク値平均

Fig.12 Average peak driving force in ascending the hill vs height of handrim

被験者 Ks は、肘屈曲角換算ハンドリム位置 70° の場合、勾配 1/20 および 1/15 は「楽」、勾配 1/12 は「少し苦」、1/10 および 1/12 は「苦」という官能評価をしている。また、ハンドリム位置 90° の場合、勾配 1/20 および 1/15 は「楽」、1/12 および 1/10 は「少し苦」、1/8 および 1/6 は「苦」という官能評価をしている。

スロープ走行時、被験者 Ks は Na のほぼ 2 倍余りの駆動力を使っている。そのため、図 13 に示すように、登坂速度は被験者 Na よりかなり大きくなっている。

ここで、スロープ走行時の駆動力ピーク値を、発揮可能な最大駆動力を 100 として正規化すると、図 14 のようになる。

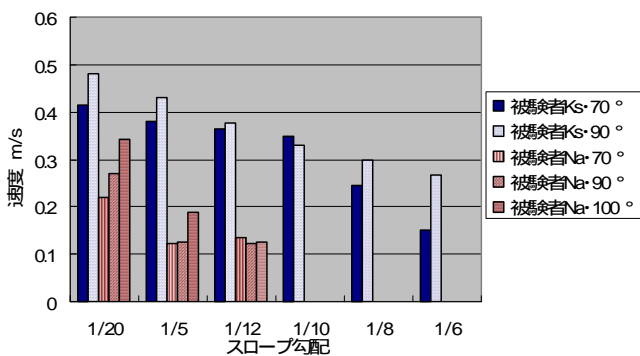


図 13 ハンドリム位置とスロープ走行時平均速度
Fig.13 Average speed in ascending the hill vs height of handrim

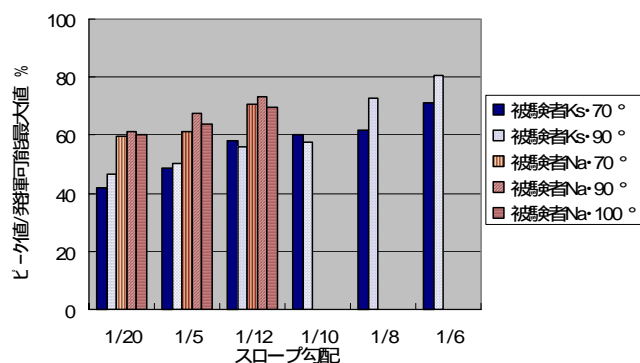


図 14 ハンドリム位置とスロープ走行時正規化駆動力ピーク値平均
Fig.14 Average normalized peak driving force in ascending the hill vs height of handrim

被験者 Ks は、肘屈曲角度変換ハンドリム位置 70° のとき、勾配 1/15 までは「楽」と評価しているが、そのときの駆動力ピーク値は最大駆動力の 49% である。そのときの負担率は 142 N·s/m である(図 15)。最大駆動力の 58% の駆動力で走行する場合は(勾配

1/12 のとき)「少し苦」と感じるようになる。そのときの負担率は 179 N·s/m である(図 15)。そして、最大駆動力の 60% の駆動力で走行する場合は(勾配 1/10 のとき)「苦」と感じている。そのときの負担率は 222 N·s/m である(図 15)。最大駆動力の 71% の駆動力で走行しなければならない場合は(勾配 1/6 のとき)途中で登坂できなくなっている。

ハンドリム位置 90° のときは、勾配 1/15 までは「楽」と感じており、そのときの駆動力ピーク値は最大駆動力の 50% である。そのときの負担率は 125 N·s/m である(図 15)。最大駆動力の 56% の駆動力で走行する場合は(勾配 1/12 のとき)「少し苦」と感じるようになる。そのときの負担率は 174 N·s/m である(図 15)。そして、最大駆動力の 73% で走行する場合は(勾配 1/8 のとき)「苦」と感じている。そのときの負担率は 320 N·s/m である(図 15)。ハンドリム位置 90° のときは、勾配 1/6 においても「苦」と感じながら登坂できている。そのときの駆動力は最大駆動力の 80% であり、負担率は 443 N·s/m である(図 15)。

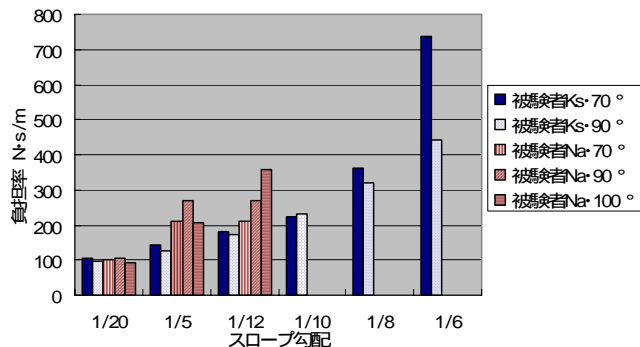


図 15 ハンドリム位置とスロープ走行時負担率
Fig.15 Momentum needed to ascend 1m on the hill vs height of handrim

被験者 Na は、いずれの肘屈曲角度変換ハンドリム位置(70°、90°、100°)の場合も、勾配 1/20 は「楽」と感じているが、そのときの駆動力ピーク値はそれぞれ最大駆動力のほぼ 60% である。そのときの負担率は 100 N·s/m である(図 15)。勾配が 1/15 になると、いずれのハンドリム位置においても「少し苦」と感じているが、そのときの駆動力ピーク値は最大駆動力の 61% (70° のとき)、68% (90° のとき)、64% (100° のとき) であり(図 14)。負担率は 210 N·s/m (70° のとき)、269 N·s/m (90° のとき)、207 N·s/m (100° のとき) である。勾配が 1/12 になると、途中で登坂できなくなっているが、そのときの駆動力ピーク値は最大駆動力の 71% (70° のとき)、73% (90° のとき)、70% (100°

のとき)である。

今回の実験結果に限ってみれば、スロープを走行する場合、発揮できる最大駆動力の60%程度以下で登坂できる勾配までが実用的領域であり、最大駆動力の70%以上を必要とする勾配は、登坂するのになかなか苦しいものと推測される。

4 まとめ

今年度、車いすにとって大きなバリアになる可能性のあるスロープ路面における走行時の負担を、計測用車いすを使って定量的に評価した。

昨年度は、柔らかいカーペット路面(毛足14mmカットパイル)が車いすにとって負担が大きくなることを明らかにしたが¹⁾、スロープ勾配はそれよりもかなり負担が大きいことが客観的なデータによって明らかになった。また、走行速度が小さいと負担率はきわめて大きくなり、力の弱い車いす使用者ほど負担が大きくなることが示唆された。また、スロープ路面での走行においては、惰走期において速度がゼロになる前に次のハンドリム駆動を行う必要がある。そのため、スロープ路面走行における惰走期の時間は水平路面走行時のそれに比べてかなり短くする必要がある。また、駆動周期もかなり短くなる。

車いすと使用者の適合性という面から重要な要因となるハンドリム位置とくに使用者との相対高さについて検証した。今回の実験結果に限って見ると、車いすに着座してハンドリム頂点を手で握ったときの肘屈曲角度が100°(内角80°)になる高さが最も操作しやすい取り付け位置であることが示唆された。そのことは、絨毯走行試験やスロープ路面走行試験からも裏付けられた。とくに、頸損者においてその傾向が顕著であった。こうしたことから、車いすを楽に操作するという観点から、操作装置であるハンドリムの取り付け位置は非常に重要であることは明らかである。今後さらにデータを増やして検証することが車いす処方を合理化するうえで重要と考える。

5 おわりに

最後に、本研究のために被験者として協力いただいた頸損者のNa氏およびYo氏に対し心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 米田郁夫他：高齢者・障害者の移動機器の最適化に関する研究開発(その1) - 走行環境と車輪アライメントが車いす操作に及ぼす影響の定量的評価 -、福祉のまちづくり工学研究所報告集平成13年度版、pp.137-141、2001
- 2) R. A. Cooper: Wheelchair Selection、第16回日本リハビリテーション工学協会車いすSIG講習会テキスト、pp.81-90、2002
- 3) 山本直樹他：車いす座面角度変化が駆動に及ぼす影響について(第2報)、第17回リハ工学カンファレンス講演論文集、pp.485-488、2002