

ハンドル形電動車いすにおける全身振動ばく露量の測定と評価

Measurement and evaluation of whole-body vibration in driving electrically powered scooters

研究代表者 工学部機械工学科*1 准教授 樹野 淳也
Junya Tatsuno
共同研究者 大学院システム工学研究科*2 博士前期課程2年 土屋 賢太
Kenta Tsuchiya
次世代基盤技術研究所*2 博士研究員 米原 牧子
Makiko Yonehara
工学部情報学科*2 講師 中村 一美
Hitomi Nakamura
工学部ロボティクス学科*2 教授 竹原 伸
Shin Takehara
総合社会学部総合社会学科*3 教授 前田 節雄
Setsuo Maeda

For the disabled and the long-lived, wheelchairs are effective to expand their field of activities. It is well known that wheelchair users are exposed to whole-body vibration when they move around on wheelchairs. Then, this paper discusses the whole-body vibration in driving an electrically powered scooter. We executed experiments to measure three axes of the frequency weighted r.m.s. acceleration on seat surface of an electrically powered scooter at three types of road surface. The experiment results suggest that the user of electrically powered scooter was exposed to considerable amplitude of whole-body vibration. In addition, it is recognized that the future work is to propose countermeasures for improving the discomfort and health effect from whole-body vibration of an electrically powered scooter seat by using 12 axes acceleration measurement based on ISO2631-1.

Keywords: whole-body vibration, electrically powered scooter, wheelchair, ISO2631-1

1. はじめに

障害や加齢により身体能力が低下すると、移動において何らかの補助器具・装置が必要となる。具体的には、杖や歩行器のように、使用者が歩行しながら使用する器具から、車いすのように着座して移動する装置が利用されている。

古くから利用者や介護者の人の力で操作する車いすが利用されてきたが、車いす利用者の自立を促すほか行動範囲を広げるために車いすの電動化が行われてきた。図1は、電動車いす安全普及協会がまとめている平成23年度時点の電動車いすの出荷台数の状況である⁽¹⁾。電動化された車いすは、このように大きく二種に分かれている。一つは、従来の手動車いす(JIS T 9201)⁽²⁾にモータやバ

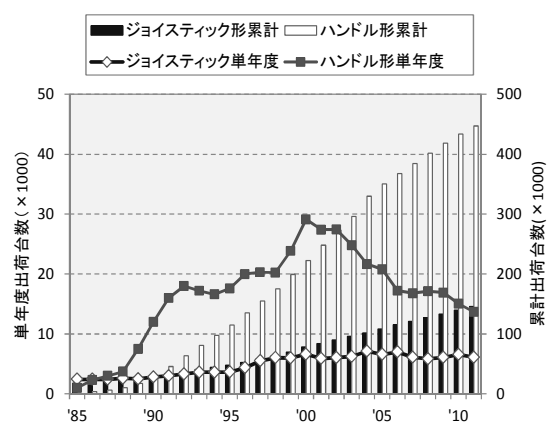


図1 電動車いすの出荷台数⁽¹⁾

ッテリを取り付けることで電動化を施した電動車いす(JIS T 9203)⁽³⁾であり、操作をジョイスティックで行うことから、ジョイスティック形とも呼ばれている。もう一つの形式は、操向操作が容易なようにジョイスティッ

*原稿受付 2013年5月13日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-mail tatsuno@hiro.kindai.ac.jp

*2 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

*3 〒577-0818 大阪府東大阪市小若江3-4-1

クでなくハンドル形式としたハンドル形電動車いす(JIS T 9208)⁽⁴⁾がある。前者は主にハンディキャップを持つ人が利用しているのに対し、後者は高齢者に利用されている。図1のように、1980年代後半より、我が国が急激な高齢社会へ突入したこともあり、高齢者が利用するハンドル形電動車いすの出荷台数が急激に伸びていることが分かる。このハンドル形電動車いすが普及するにつれ、道路環境や法の未整備、公共交通機関への乗り入れ、駐車スペースや外出時の充電問題、操作ミスによる事故等の問題がクローズアップされている⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

一方、乗用型の乗り物を利用する場合、移動中に乗員は振動ばく露される。この振動により、乗員は快・不快を感じるほか、振動の程度によっては健康への影響が懸念されることになる。車いすも乗用型の乗り物の一つであり、乗員に対する振動ばく露は考慮されるべきものである。これまでに、手動車いすや電動車いすにおける全身振動ばく露量を測定・評価したいくつかの研究が報告されている⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾が、ハンドル形電動車いすに関する研究はほとんど見当たらない。そこで、本研究では、乗用型車両の全身振動ばく露の測定および評価を規定している国際規格 ISO2631-1⁽¹¹⁾にもとづき、ハンドル形電動車いすの振動ばく露量の測定を実施したので、その結果を報告する。

2. 材料及び方法

2.1 供試車両

図2および表1に、供試したハンドル形電動車いす(三浦工業, MSE-1)の外観および仕様の抜粋を示した。なお、ハンドル形電動車いすには3輪と4輪のものが流通しているが、本供試車両は3輪である。

2.2 実験路面

近畿大学広島キャンパス周辺の舗装路面を実験路面に選択した。路面条件を表2にまとめるとともに、図3から図5に外観を示した。なお、路面2および路面3は同一の歩道であり、約4%の勾配があった。また、路面1は約1%勾配であった。

2.3 全身振動ばく露量の測定と評価

測定機器として、リオン社の座席用振動ピックアップ(PV-62)をシート上に設置し、振動計(VM54)に接続した(図6)。

これらの機器を用いることにより、ISO2631-1⁽¹¹⁾に基づいた直交3軸の周波数補正振動加速度実効値(a_{wx} , a_{wy} , a_{wz})を得ることができる。さらに、次式を用い、得られた直交3軸の周波数補正振動加速度実効値から、座面上での3軸合成周波数補正振動加速度実効値 a_v が求まる。

表1 供試したハンドル形電動車いすの仕様⁽¹²⁾

| | |
|----------|---------------------------------|
| 形式 | MSE-1 |
| 全長×全幅×全高 | 1190 mm×690 mm×975 mm |
| 質量 | 88 kg |
| 車輪数 | 前輪1輪, 後輪2輪 |
| 車輪サイズ | 前後輪とも 3.00-4-4PR |
| モータ出力 | 24 V-360 W |
| バッテリー容量 | 12 V-33 Ah×2 |
| 駆動方式 | 後2輪駆動方式 |
| 最高速度(前進) | 高速 6 km/h, 中速 4 km/h, 低速 2 km/h |
| 最高速度(後進) | 1.5 km/h |
| 実用登坂角度 | 10° |
| 段差乗り越え高さ | 80 mm |
| 溝乗り越え幅 | 150 mm |



図2 供試したハンドル形電動車いすの外観

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

なお、 k_x , k_y , k_z は無次元の倍率因子であり、快適性評価の場合は、

$$\begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

と定義されており、健康影響評価の場合は、

$$\begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

である。

このように求められた3軸合成周波数補正振動加速度実効値 a_v を、乗り心地のような快適性については、表3に示されたカテゴリーを用いて評価する。

2.4 実験手順

供試車両に実験者が搭乗し、3種類の路面を、3段階の車両速度(低速: 2 km/h, 中速: 4 km/h, 高速: 6 km/h)

表 2 路面条件

| | |
|------|----------------|
| 路面 1 | アスファルト路面 |
| 路面 2 | タイル路面 |
| 路面 3 | 片輪が点字ブロックに乗り上げ |



図 3 アスファルト路面（路面 1）



図 4 タイル路面（路面 2）



図 5 点字ブロック路面（路面 3）

で 1 分間走行させ、ばく露される振動を測定した。前述のように、路面には勾配があったため、同一速度で上り勾配と下り勾配の測定を実施した。なお、全ての測定において同一の実験者（身長 165 cm、体重 55 kg）とした。

3. 結果及び考察

3.1 軸成分の評価

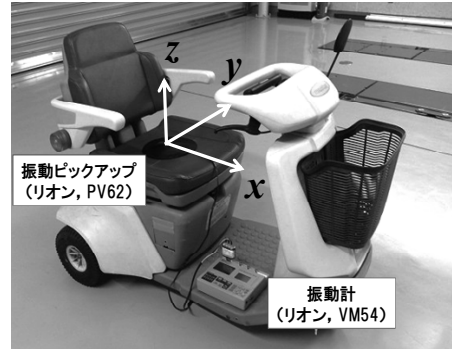


図 6 測定機器

表 3 加速度レベルと不快感

| Acceleration | Discomfort |
|-----------------------------------------------|-------------------------|
| Less than 0.315 m/s^2 | not uncomfortable |
| 0.315 m/s^2 to 0.63 m/s^2 | a little uncomfortable |
| 0.5 m/s^2 to 1 m/s^2 | fairly uncomfortable |
| 0.8 m/s^2 to 1.6 m/s^2 | uncomfortable |
| 1.25 m/s^2 to 2.5 m/s^2 | very uncomfortable |
| Greater than 2 m/s^2 | extremely uncomfortable |

まず、各路面の走行時に測定された直交 3 軸の加速度について考察を行う。

(a) 路面 1

路面 1（アスファルト路面）を走行時に測定された各軸の周波数補正振動加速度実効値を、表 4 および図 7 に示した。

最も車速の遅い低速設定では、x、y、z のそれぞれの成分の加速度に大きな差が見られないが、車速が上がるにつれ z 軸の加速度が大きくなっていることがわかる。具体的には、低速時の加速度に対し、中速では約 3 倍、高速では約 4 倍の加速度となっている。上りと下りの勾配の差は、あまりないと言える。

(b) 路面 2

路面 2（タイル路面）を走行時に測定された各軸の周波数補正振動加速度実効値を、表 5 および図 8 に示した。車速の変化に対する各軸の加速度変化の傾向は路面 1 と同様で、z 軸の加速度が、中速では約 3 倍に、高速では約 4.5 倍へと増大している。この路面においても、勾配の方向による違いはないと判断できる。

(c) 路面 3

表 6 および図 9 は、路面 3（点字ブロック路面）を走行時に測定された各軸の周波数補正振動加速度実効値である。路面 1 および路面 2 と同様の傾向を示しており、z 軸の加速度が、中速では約 3 倍に、高速では約 4 倍の大

表 4 周波数補正振動加速度実効値 (路面 1)

| 車速 | 勾配 | $a_{wx}(m/s^2)$ | $a_{wy}(m/s^2)$ | $a_{wz}(m/s^2)$ |
|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| 低速 | 上り | 0.122 | 0.084 | 0.126 |
| | 下り | 0.186 | 0.163 | 0.130 |
| 中速 | 上り | 0.134 | 0.119 | 0.381 |
| | 下り | 0.183 | 0.094 | 0.389 |
| 高速 | 上り | 0.188 | 0.137 | 0.479 |
| | 下り | 0.199 | 0.108 | 0.517 |

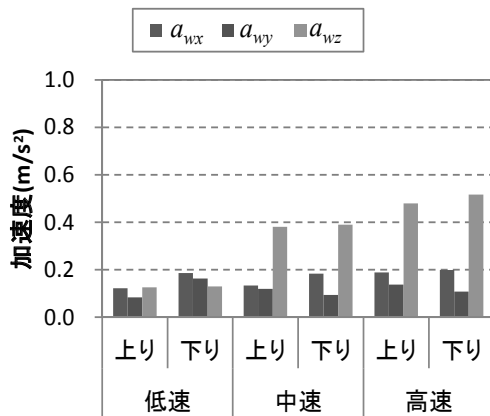


図 7 周波数補正振動加速度実効値 (路面 1)

さになっているほか、勾配方向による差はない。

(d) 路面による違い

次に、路面の違いによる各軸の周波数補正振動加速度実効値の相違について考察する。図 10 は、それぞれの路面で測定された上りと下りの加速度から求めた平均値を示している。車速が低速の場合は、路面による加速度の大きな違いが見られないが、車速が大きくなるにつれ、路面による違いが大きくなっている。具体的には、点字ブロックに片輪が乗り上げている路面 3 における z 軸の加速度が、他の路面より大きく上回っていることがわかる。

次に、このような加速度レベルで構成される全身振動ばく露が、快適性や健康影響に及ぼす影響について評価するために、3 軸合成値を算出して議論を進める。

3.2 3 軸合成値による快適性評価

前述のように、直交 3 軸の周波数補正振動加速度実効値(a_{wx} , a_{wy} , a_{wz})から、快適性評価のための座面上での 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値 a_v は、式(1)を用いることで算出できる。表 7 は、図 10 に示した直交 3 軸の周波数補正振動加速度実効値を用いて算出した 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値である。さらに、値の比較が容易なように図 11 にグラフを示した。

表 5 周波数補正振動加速度実効値 (路面 2)

| 車速 | 勾配 | $a_{wx}(m/s^2)$ | $a_{wy}(m/s^2)$ | $a_{wz}(m/s^2)$ |
|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| 低速 | 上り | 0.153 | 0.104 | 0.140 |
| | 下り | 0.149 | 0.107 | 0.144 |
| 中速 | 上り | 0.179 | 0.132 | 0.415 |
| | 下り | 0.206 | 0.131 | 0.453 |
| 高速 | 上り | 0.254 | 0.142 | 0.675 |
| | 下り | 0.194 | 0.169 | 0.640 |

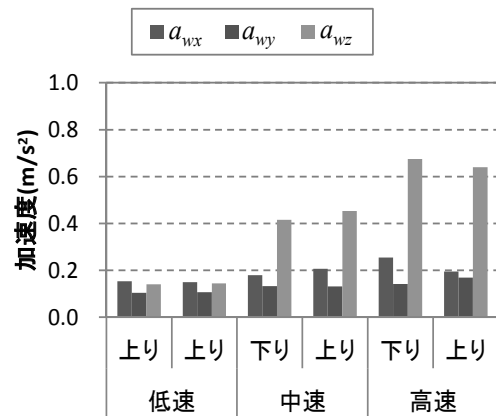


図 8 周波数補正振動加速度実効値 (路面 2)

表 6 周波数補正振動加速度実効値 (路面 3)

| 車速 | 勾配 | $a_{wx}(m/s^2)$ | $a_{wy}(m/s^2)$ | $a_{wz}(m/s^2)$ |
|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| 低速 | 上り | 0.161 | 0.111 | 0.201 |
| | 下り | 0.186 | 0.129 | 0.214 |
| 中速 | 上り | 0.209 | 0.157 | 0.553 |
| | 下り | 0.266 | 0.165 | 0.619 |
| 高速 | 上り | 0.174 | 0.202 | 0.806 |
| | 下り | 0.221 | 0.204 | 0.752 |

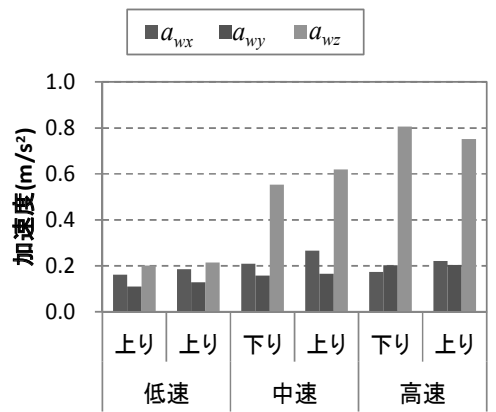


図 9 周波数補正振動加速度実効値 (路面 3)

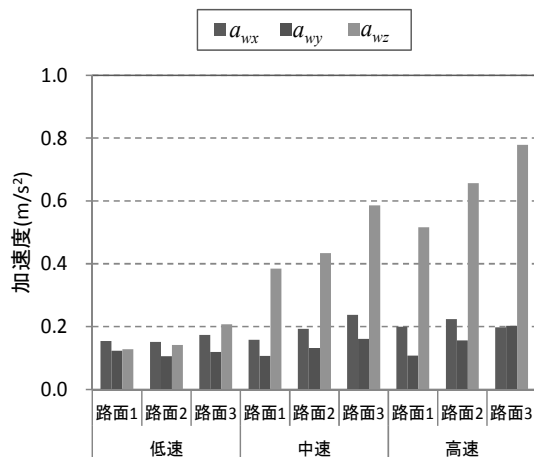


図 10 周波数補正振動加速度実効値

得られた 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値を表 3 のカテゴリーで評価すると次のようになる。車速が低速の設定では、いずれの路面においても 0.315 m/s^2 未満であるため、not uncomfortable（不快でない）レベルと判断される。一方、中速における路面 1 および路面 2 は、 0.5 m/s^2 未満のため a little uncomfortable（少し不快）となるのに対し、路面 3 は 0.63 m/s^2 を上回っていることから、カテゴリーが一段階上がり、fairly uncomfortable（やや不快）に判別されることとなる。他方、高速での路面 1 の 3 軸合成値は 0.564 m/s^2 となったが、これは、a little uncomfortable（少し不快）と fairly uncomfortable（やや不快）がオーバーラップした加速度となっている。なお、このカテゴリーのオーバーラップについては、現在の ISO2631-1 の問題点として指摘され、改善に関する幾つかの研究が報告されているほか^{(13),(14)}、ISO/TC108/SC4 にて改定の議論が行われている。

高速設定における路面 2 の加速度は、中速の路面 2 と同様に fairly uncomfortable（やや不快）に分類されるものとなっている。また、高速設定の路面 3 での加速度は 0.8 m/s^2 を越えていることから、fairly uncomfortable（やや不快）と uncomfortable（不快）がオーバーラップする範囲で、条件によっては乗員にとっての乗り心地は不快なものになることがわかる。

ハンドル形電動車の利用者は、狭小な路面での走行を除きほとんどの走行を高速(6 km/h)で行っている。このことを考慮すると、本測定の結果において、fairly uncomfortable（やや不快）のカテゴリー以上の加速度レベルが出てきたことは無視することができないであろう。また、都市部では、歩道に障害物があることも多く、本実験のように点字ブロックに乗り上げるようなケースが

表 7 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値
(快適性評価)

| 車速 | 路面 | $a_v(\text{m/s}^2)$ |
|----|------|---------------------|
| 低速 | 路面 1 | 0.235 |
| | 路面 2 | 0.233 |
| | 路面 3 | 0.296 |
| 中速 | 路面 1 | 0.430 |
| | 路面 2 | 0.493 |
| | 路面 3 | 0.652 |
| 高速 | 路面 1 | 0.564 |
| | 路面 2 | 0.712 |
| | 路面 3 | 0.829 |

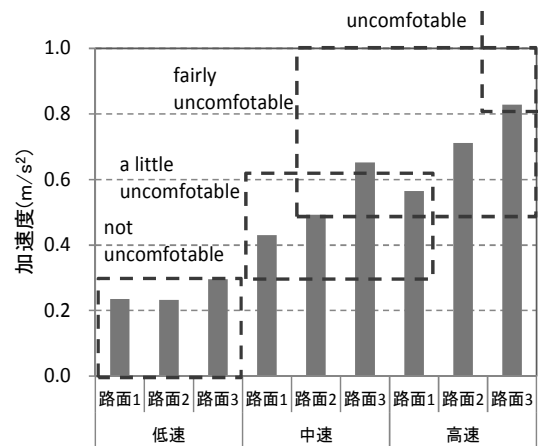


図 11 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値

起こることは容易に予想でき、何らかの対策が必要であると言える。

3.3 3 軸合成値による健康影響の評価

全身振動ばく露は、搭乗中の快・不快のみならず、人体の健康に影響をおよぼすことになる。全身振動ばく露による疾病の代表例は腰痛であるが、その予防のために許容される振動ばく露量を導くことが要求される。そこで、健康影響評価のための倍率因子を用いて算出した座面上での 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値 a_v を、表 8 にまとめた。この表から、3 軸合成周波数補正振動加速度実効値が最も大きくなるのは、路面 3 を高速で走行する場合で、その値は 0.874 m/s^2 となっていることがわかる。

全身振動ばく露の健康影響を評価する場合、ばく露時間を 8 時間として標準化した 8 時間等価周波数補正振動加速度実効値 $A(8)$ が用いられている⁽¹⁵⁾。

表 8 3 軸合成周波数補正振動加速度実効値
(健康影響)

| 車速 | 路面 | $a_v(m/s^2)$ |
|----|------|--------------|
| 低速 | 路面 1 | 0.305 |
| | 路面 2 | 0.294 |
| | 路面 3 | 0.361 |
| 中速 | 路面 1 | 0.469 |
| | 路面 2 | 0.543 |
| | 路面 3 | 0.710 |
| 高速 | 路面 1 | 0.606 |
| | 路面 2 | 0.760 |
| | 路面 3 | 0.874 |

$$A(8) = \sqrt{\frac{a_v^2 \cdot t}{8h}} \quad (4)$$

現在、この 8 時間等価周波数補正振動加速度実効値 $A(8)$ は 0.5 m/s^2 とすることが一般的となっており⁽¹⁶⁾、式 (4) を t について解くことにより、健康影響評価から見た 1 日の全身振動ばく露の許容時間 t を求めることができる。

$$t = \frac{A(8)^2 \cdot 8h}{a_v^2} \quad (5)$$

ここで、 a_v と $A(8)$ に、それぞれ 0.874 m/s^2 、 0.5 m/s^2 を代入することにより、

$$t = \frac{(0.5 \text{ m/s}^2)^2 \cdot 8h}{(0.874 \text{ m/s}^2)^2} \cong 2.6 \text{ h} \quad (6)$$

を得る。このことは、路面 3 を高速で走行する際に測定された振動レベルがばく露される際には、1 日に 2.6 h が許容される運転時間であることを意味している。つまり、このハンドル形電動車いすを利用し、片道 1.3 h の外出先までの移動を続けると腰痛の疾患が起こる可能性が高まるということである。前述のように、ハンドル形電動車いすの利用者は高齢者が中心であることを考慮すると、危険性はより高いものと予想される。

3.4 対策について

本実験の結果より、ハンドル形電動車いすの乗車時にばく露される振動は決して小さくなく、何らかの対策が必要であると判断できる。

第一の対策は、シートに利用されているクッション材の見直しであろう。市販されているハンドル形電動車いすのシートは、非常に簡易なウレタンスポンジが内挿されているのみであり、自動車用シートの快適性に関する

既往の研究が応用できるものと思われる^{(17),(18)}。その他の対策としては、タイヤサイズの変更やサスペンション機構の導入、フレームの見直しなど設計変更を伴う項目となる。

このように、部品の再設計を行うには、部品と振動との関係を明らかにする必要がある。本実験で用いた評価手法では、時系列の加速度波形を周波数補正した上で実効値を求め、さらに 3 軸合成した値を評価に用いている。本実験のような現場的な測定の場合は、座席上の直交 3 軸を測定することが多いが、ISO2631-1⁽¹⁰⁾における座位の快適性（乗り心地）評価のための全身振動測定は、図 12 に示すように厳密には 12 軸（足部：直交 3 軸、座席：直交 3 軸＋回転 3 軸、背もたれ：直交 3 軸）で実施することになっている。

今後は、いくつかの供試車両を用意し、12 軸の全身振動ばく露測定を実施することにより、快適性の高いハンドル形電動車いすを提案する予定である。

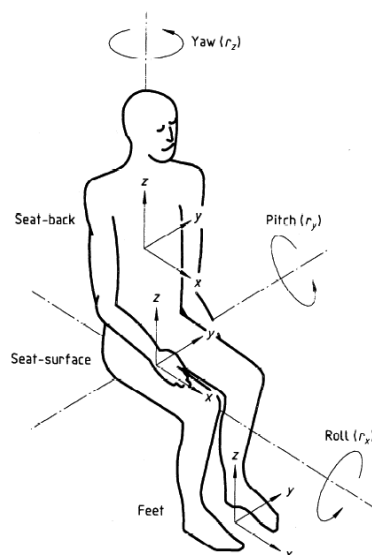


図 12 ISO2631-1 における 12 軸成分⁽⁷⁾

4. おわりに

ハンドル形電動車いすの問題の一つである「乗り心地」問題の提起のために、市販のハンドル形電動車いすの全身振動ばく露量を測定する実験を行った。実験の結果、路面の状況によっては、ISO2631-1 の基準における「不快(uncomfortable)」の振動がばく露されることが分かった。

今後は、既存のハンドル形電動車いすの全身振動暴露軽減対策について検討するほか、12 軸の全身振動測定を

行った結果をもとに、快適性の高いハンドル形電動車いすを提案する予定である。

参考文献

- (1) 電動車いす安全普及協会,
<http://www.den-ankyo.org/society/transition.html>
- (2) 日本規格協会, “JIS T 9201 手動車いす”, (2006)
- (3) 日本規格協会, “JIS T 9203 電動車いす”, (2010)
- (4) 日本規格協会, “JIS T 9208 ハンドル形電動車いす”, (2009)
- (5) 国民生活センター, “電動3・4輪車の安全性”, (2007)
- (6) 国土交通省, “交通バリアフリー技術規格調査研究報告書”, (2003)
- (7) 中島佐智子, 柏原士郎, 横田隆司, 吉村英祐, 飯田匡, “ハンドル形電動車いすによる施設利用上の問題点とその改善方策について -電動車いすユーザーに対応する生活環境のあり方に関する研究 その2-”, 日本建築学会計画系論文集, 598(2005), pp.21-28.
- (8) Setsuo MAEDA, Makoto FUTATSUKA, Jiro YONESAKI, Maki IKEDA, “Relationship between Questionnaire Survey Results of Vibration Complaints of Wheelchair Users and Vibration”, Environmental Health and Preventive Medicine, 8(3)(2003), pp. 82-89.
- (9) Erik Wolf, Rory A. Cooper, Jonathan Pearlman, Shirley G. Fitzgerald, Annmarie Kelleher, “Longitudinal assessment of vibrations during manual and power wheelchair driving over select sidewalk surfaces”, Journal of Rehabilitation Research & Development, 44(4)(2007), pp.573-580.
- (10) Rory A. Cooper, Erik Wolf, Shirley G. Fitzgerald, Michael L. Boninger, Rhys Ulerich, William A. Ammer, “Seat and footrest shocks and vibrations in manual wheelchairs with and without suspension”, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 84(2003), pp.96-102.
- (11) International Organization for Standardization, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. ISO 2631-1 (1997)
- (12) 三浦工業株式会社 (現キーレックス株式会社), MSE-1 取り扱い説明書
- (13) Chikako KANEKO, Takahide HAGIWARA, Setsuo MAEDA, “Evaluation of Whole-Body Vibration by the Category Judgment Method”, Industrial Health, 43(2005), pp.221-232.
- (14) Setsuo MAEDA, “Necessary Research for Standardization of Subjective Scaling of Whole-Body Vibration”, Industrial Health, 43(2005), pp.390-401.
- (15) Neil J. Mansfield, “Human Response to Vibration”, CRC Press(2005), pp.116-118.
- (16) Health and Safety Executive, “Proposals for new Control of Vibration at Work Regulations implementing the Physical Agents (Vibration) Directive (2002/44/EC) Whole-body Vibration”, HSE Books (2005), pp.13-20.
- (17) Kazushige Ebe, Michael J. Griffin, “Factors affecting static seat cushion comfort”, Ergonomics, 44(10)(2001), pp.901-921.
- (18) 西松豊典, 金井博幸, 西岡孝彦, 木村裕和, 山本貴則, “座部パッド硬度が自動車シートの「座り心地」に及ぼす影響”, 繊維学会誌, 66(1) (2010), pp.20-25.