

# 車いすの振動加速度を用いた 歩道路面凹凸の評価に関する研究

岡村 美好<sup>1</sup>・深田 直紘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 山梨大学大学院助手 医学工学総合研究部 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

<sup>2</sup>山梨県技師 富士北麓・東部地域振興局都留建設部 (〒402-0054 都留市田原 3-3-3)

歩道路面凹凸の評価方法として車いすの振動加速度と乗員の乗り心地に着目し、歩道走行時の車いすの振動加速度を用いた車いす乗員の乗り心地の評価を試みた。まず、歩道走行時の車いすについて前輪および後輪付近の鉛直方向、進行方向、横方向の振動加速度を測定し、前輪と後輪における応答の違い、走行速度および乗員の重量の影響等について検討した。次に、測定結果を基に車いすの加速度レベルと人体の振動感覚補正特性を考慮した振動レベルを算出し、車体振動と人体振動の観点から路面凹凸の評価を行った。その結果、今回車いす振動を測定した路面は、車いす乗員の人体に有意な生理的影響を及ぼし始めるレベルの振動を車いすに生じさせることが明らかになった。

*Key Word* : wheelchair, vibration acceleration, sidewalk pavement, unevenness evaluation

## 1. はじめに

2000年に交通バリアフリー法が制定され、各地で道路のバリアフリー化が進められようとしている。効率的なバリアフリー化のためには適切な指標によって現状を評価することが必要となる。

道路の幅員や縦・横断勾配、段差に関しては「道路の移動円滑化整備ガイドライン」<sup>1)</sup>等において数値基準が示されておりこれらを指標とすることができるが、舗装路面の平坦性に関しては明確な基準が示されていない。舗装路面の凹凸は高齢者のつまずきの原因となるだけでなく、車いすや乳母車、自転車に振動を生じさせて安全で快適な通行を妨げ、車いす使用者には身体のケイレンなどの症状を引き起こす場合もあることから、平坦性に関する明確な基準の設定が急がれている。

車いすの振動に着目した路面凹凸の評価は、牧ら<sup>2)</sup>や坂口ら<sup>3)</sup>によって試みられている。

牧ら<sup>2)</sup>は、車いす前輪の軸上に垂直方向と水平方向の加速度計を取り付けて歩道走行時の応答を測定した。そして、周波数分析結果と振幅積分値を用いて路面凹凸の評価を行ない、振幅積分値は目地幅に影響され、

段差が大きいと振幅積分値が大きくなること等を明らかにしている。また、体重と走行速度の影響についても検討し、体重の影響はほとんどないこと、走行速度が一定であれば凹凸の相対的な評価が可能であることを示している。

坂口ら<sup>3)</sup>は、車いす後輪の車軸に鉛直方向の振動センサを取り付け、各種舗装材料の歩道を走行した時の車いすの振動レベルを求め、インターロッキングブロックや透水性舗装を通行した時の車いすの振動を評価している。

これらではセンサの設置位置や対象とする振動加速度の方向に関する検討が行われておらず、歩道通行時の車いすの振動特性も明らかにされていない。

そこで、本研究では、車いすの振動加速度と乗員の乗り心地に着目して、歩道走行時の車いすの前輪と後輪付近の3軸方向振動加速度を測定し、車いす振動の基本特性を明らかにした。さらに、歩道路面凹凸の評価指標として、測定した車いすの振動加速度を用いて車いすの加速度レベルと人体の振動感覚補正特性を考慮した振動レベルを算出し、車体振動と人体振動の観点から路面凹凸の評価を試みた。

## 2. 車いす振動の測定方法

写真-1 に測定に使用した車いすと路面を 表-1 に使用した車いすの主要寸法を示す。車いすは自走式の背もたれ固定式タイプの標準的なもので、これに測定者が乗員となって測定器を膝に乗せてすわり、後ろから介助者が押して走行させた。図-1 に測定路面のブロック配置と進行方向を示す。ブロック寸法は 19cm×9cm、目地幅は 1cm で、敷設パターンはヘリンボンボンドである。進行方向には短辺 2 個と長辺 1 個で 1 組のパターンの繰り返しとなっている。



写真-1 測定に使用した車いす

表-1 測定に使用した車いすの主要寸法

箇所	全長	前輪直径	後輪直径	全幅	重量
寸法	1070mm	160mm	610mm	610mm	162N

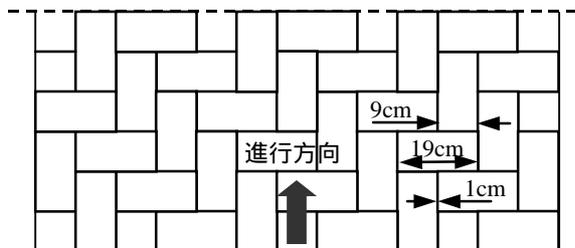


図-1 測定路面のブロック配置と進行方向

車いす振動の測定は、車いすを押し始める時の速度変化を考慮して 3m の助走区間を設け、その後の 30m を測定区間として行った。車いすの振動加速度は、車いすの前輪および後輪に接続するフレームにモーションレコーダ (MVP- A3-02A, マイクロストーン) を固定し、サンプリングタイム 5ms で 3 方向 (進行方法を x、横方向を y、鉛直方向を z とする) の振動加速度を測定した。

表-2 に測定ケースの一覧を示す。振動の評価は表中の走行速度を基準として複数回測定した値の平均値を用いて行った。また、表中の重量は測定者の体重と測定器の重量を合計したものである。

表-2 測定ケース一覧

測定ケース名	重量 (N)	モーションレコーダ設置位置	走行速度 (km/h)	測定回数
FA	740	前輪	5.0	4
FB			4.0	2
FC			3.5	2
RA		後輪	5.0	4
RB			4.0	2
RC			3.5	2
R54	530	後輪	4.5	4
R65	640			4
R75	740			4

測定結果については、x、y、z 軸方向の振動加速度の応答波形とパワースペクトルを求めて、ブロック配置と応答の周期性について検討した。振幅は、応答波形が路面凹凸により複雑な波形になるので、振動加速度実効値を用いて検討を行った。振動加速度実効値は、振動加速度の n 番目の測定データを  $a_n$ 、測定データ数を N とすれば次式で求められる。

$$a_{r.m.s} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (a_n)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

## 3. 測定結果

### (1) 振動加速度応答波形

図-2 に、測定ケース FA, RA で得られた振動加速度波形の一部を示す。

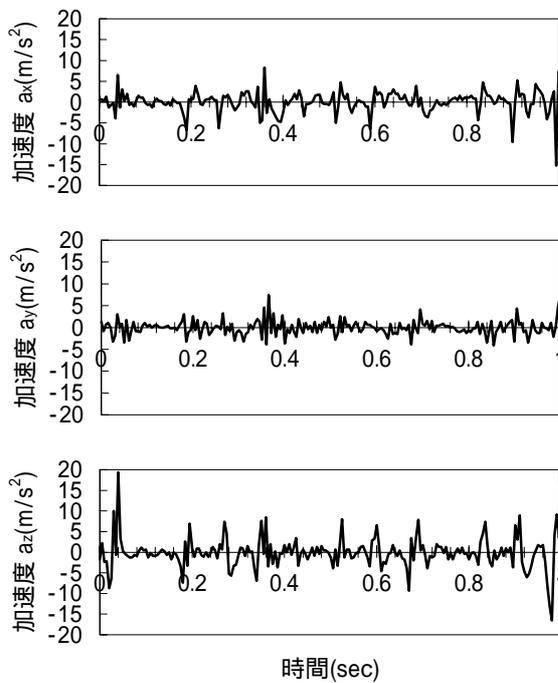
前輪 y 軸方向の応答波形を除いた他の応答波形では周期的な振幅の増大が現れている。図-1 のブロック配置と進行方向より、周期的な振幅の増大はブロックの目地の配置に対応していることがわかる。前輪 y 軸方向の応答波形において他の応答波形のような明確な周期性が現れていないのは、前輪はキャスターになっているので路面の凹凸により自由に回転するためと考えられる。

振幅増大時の 3 方向の振幅を比較すると、前輪、後輪共に z 軸方向の振幅が最も大きくなっている。また、x 軸方向では負の加速度すなわち後方への加速度、z 軸方向では正の加速度すなわち上方への加速度が大きいことがわかる。

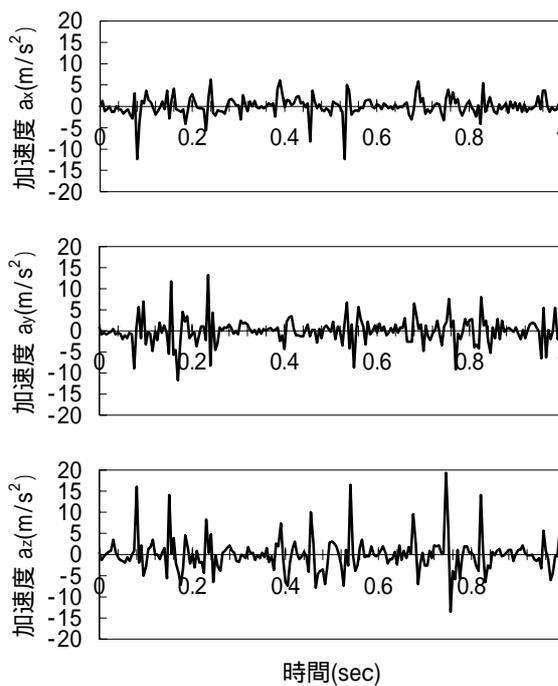
なお、測定ケース FA, RA で得られた最大振動加速度は z 軸方向の  $28.5\text{m/s}^2$  であった。

### (2) パワースペクトル

図-3 に、測定ケース FA, RA の振動加速度波形のパワースペクトル (Hanning ウィンドウを用いて平滑化) を示す。



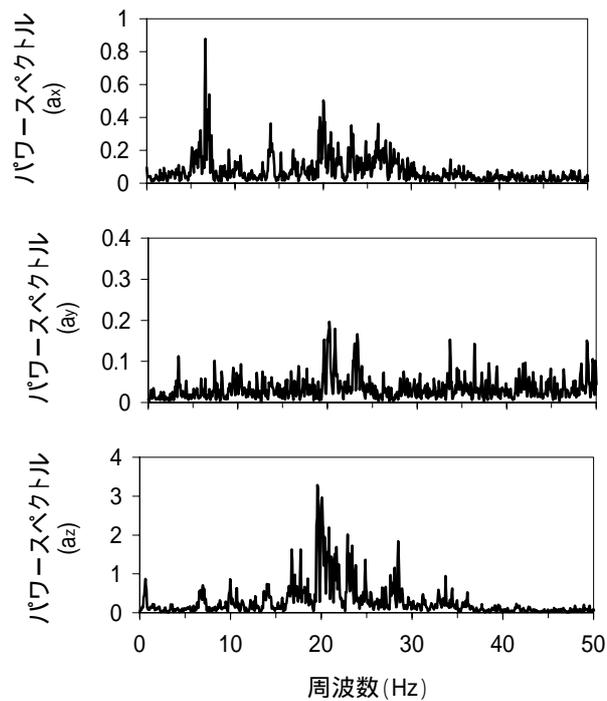
(1) 前輪 (FA)



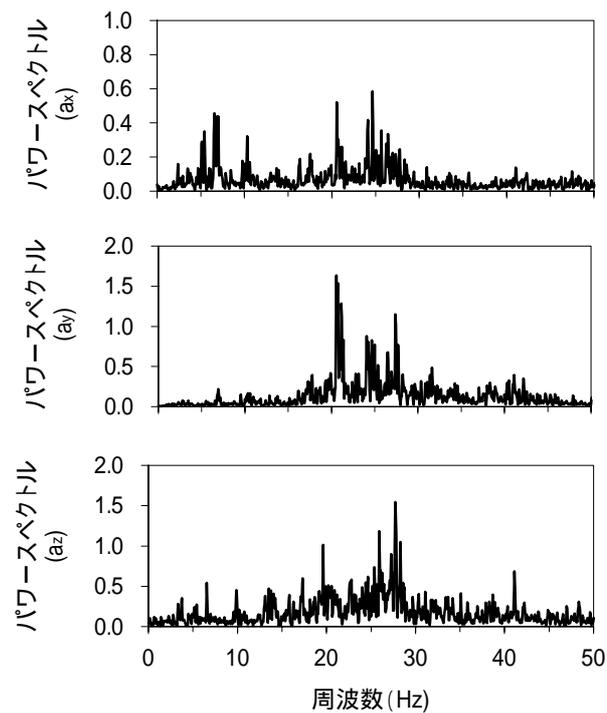
(2) 後輪 (RA)

図-2 振動加速度応答波形

最大スペクトル振幅は前輪 z 軸方向が最も大きく、次いで後輪 y 軸方向、後輪 z 軸方向となっている。卓越周波数の多くは、前・後輪共にいずれの方向でも 30Hz 以下に生じており、顕著なピークは x 軸方向では 10Hz 以下に、y z 軸方向では 20~30Hz に生じている。しかし、スペクトル振幅が大きくなる周波数はいずれもほぼ一致している。



(1) 前輪 (FA)



(2) 後輪 (RA)

図-3 振動加速度のパワースペクトル

図-1 に示したブロック舗装上を走行速度 5.0km/h (1.4m/s) で走行した場合、車いすには 7Hz および 14Hz の周波数で目地の影響が生じることが予想される。これらの値とスペクトル振幅が大きい周波数を比較すると、これらの整数倍の周波数 (7, 14, 21, 28Hz) 付近のスペクトル振幅が増大していることがわかる。

表-3 は人体の共振振動数を示したものである。図-3 の周波数特性を比較すると、人体の共振振動数は卓越周波数が生じる 30Hz 以下であることから、図-1 に示した測定路面を走行した場合には車いす乗員の身体にこれらの共振が引き起こされる可能性があることがわかる。また、座位の人体では 5Hz 前後で脊柱や頭部のピッチング、骨盤ピッチングの共振が生じるとの報告<sup>5)</sup>もあり、ブロックの目地間隔や走行速度によってはこれらについても検討する必要があると考えられる。

表-3 人体の共振振動数<sup>4)</sup>

振動数(Hz)	5~8	13~16	25~30
箇所	内臓	声帯	眼球

### (3) 振動加速度実効値

表-4 に式(1)を用いて求めた測定ケース FA, RA における振動加速度実効値の平均値を示す。

前・後輪共に z 軸方向の値が最も大きい。前輪 x・y 軸方向の値は z 軸方向の値の約 50% を示し、後輪 y 軸方向の値は z 軸方向の値の 82% を示している。これより、z 軸方向(鉛直方向)だけでなく x・y 軸方向(進行方向・横方向)の振動も考慮して評価する必要があると考えられる。

また、x 軸方向の値は前輪と後輪の差がわずかであるが、y 軸方向の値は後輪のほうが大きく、z 軸方向の値は前輪のほうが大きくなっている。これらは、前述のように前輪はキャストになっているので自由に回転できること、また、前輪はソリッドタイヤなので路面凹凸がそのまま車体に伝達されるが、後輪は空気入りタイヤなので路面凹凸からの衝撃が吸収されることによると考えられる。

表-4 前輪と後輪の振動加速度実効値の違い

	$a_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_z$ (m/s <sup>2</sup> )
前輪	2.33	2.05	4.09
後輪	2.36	3.15	3.80

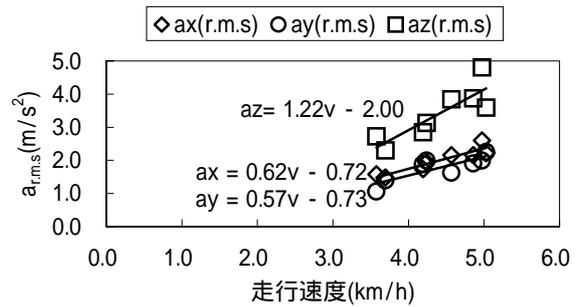
### (4) 走行速度の影響

図-4 は、測定ケース FA, FB, FC および RA, RB, RC における振動加速度実効値と走行速度の関係プロットし、それらの近似直線を示したものである。図中の  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  はそれぞれ x, y, z 軸方向の振動加速度実効値を表す。

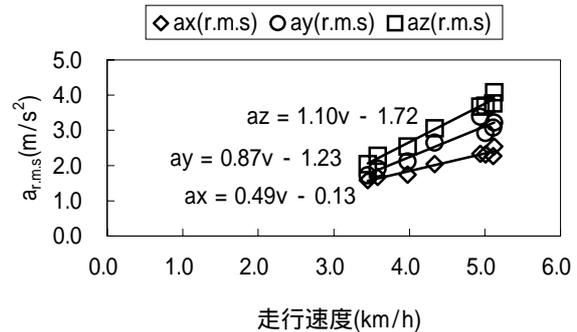
前輪および後輪における 3 方向の振動加速度実効値と走行速度はいずれも線形関係にあり、車いすの走行速度が大きくなると車いすの振動加速度実効値も増大することがわかる。また、車いすの走行速度の影響は前輪 z 軸方向にもっとも顕著に表れている。

表-5 は図-4 における各方向の振動加速度実効値と走行速度の相関係数を示したものである。後輪よりも

前輪の相関係数が小さく、最も相関係数が小さいのは前輪 y 軸方向で 0.83 である。



(1) 前輪 (FA, FB, FC)



(2) 後輪 (RA, RB, RC)

図-4 振動加速度実効値と走行速度の関係

表-5 走行速度と振動加速度実効値の相関係数

	$a_x$	$a_y$	$a_z$
前輪	0.92	0.83	0.87
後輪	0.98	0.97	0.99

### (5) 乗員重量の影響

図-5 は、測定ケース R54, R65, R75 における振動加速度実効値の平均値と重量の関係プロットしたものである。図中の  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  はそれぞれ x, y, z 軸方向の振動加速度実効値を表し、数字は各点の振動加速度実効値の数値である。

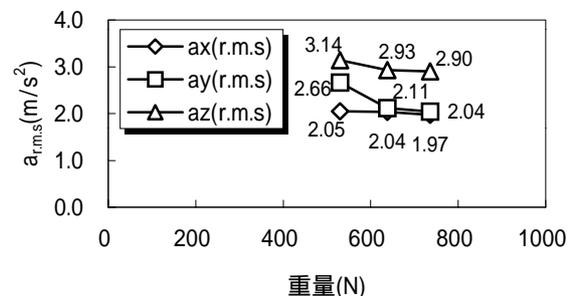


図-5 振動加速度実効値と重量の関係(後輪)

重量が減少すると振動加速度実効値は増加し、重量 210N の減少により x, z 軸方向はそれぞれ 4, 8% の増加であるのに対し、y 軸方向の振動加速度実効値は約

30%増加している．この結果は，牧ら<sup>2)</sup>による体重差の影響はほとんどないという報告とは異なるものとなっている．

#### 4．路面凹凸の評価方法

歩道走行時の車いすの振動加速度実効値を車いす振動に基づく路面凹凸の評価指標とすれば，これらの測定結果に図-6に示す JIS C 1510 に定められた鉛直方向振動および水平方向振動に対する振動感覚補正を行った周波数加重加速度実効値を求めることにより人体振動に基づく評価指標とすることができる．本研究では，車いすの振動加速度実効値および周波数加重加速度実効値を求め，これらに対数尺度に変換して  $10^{-5}(\text{m/s}^2) = 0\text{dB}$  とする振動加速度レベルおよび振動レベルで評価することとした．

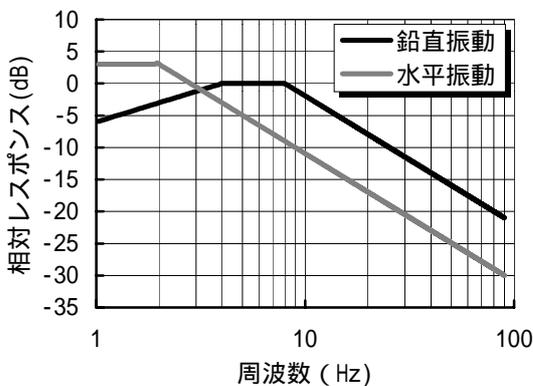


図-6 人体の振動感覚補正特性<sup>6)</sup>

振動加速度の測定データを用いた振動加速度レベルおよび振動レベルの算出は以下の緒式を使用して行った．

人体の振動感覚補正特性を考慮した周波数加重加速度実効値は，1～90Hz を対象周波数として，周波数  $i\text{Hz}$  の成分の振動加速度実効値を  $a(i)$ ，周波数  $i\text{Hz}$  における相対レスポンスの dB 数を  $C_w(i)$  とすれば，次式で求められる<sup>7)</sup>．

$$a_w = \left[ \sum_f a(i)^2 10^{C_w(i)/10} \right]^{1/2} \quad (2)$$

振動加速度実効値  $a(i)$  は，振動加速度応答の周波数分析の基本振動数を  $\Delta f$ ，周波数  $i\text{Hz}$  の成分のパワースペクトルを  $G(i)$  とすれば次式で求められる<sup>8)</sup>．

$$a(i)^2 = \Delta f \cdot G(i) \quad (3)$$

ここに式(3)を式(2)に代入すれば，式(2)は次式

のように書き換えることができる．

$$a_w = \left[ \sum_f \Delta f \cdot G(i) \cdot 10^{C_w(i)/10} \right]^{1/2} \quad (4)$$

これより，次式を用いて振動レベルを求めることができる．

$$L_w = 10 \log \left[ \sum_f \Delta f \cdot G(i) \cdot 10^{C_w(i)/10} / (a_0)^2 \right] \quad (5)$$

ここに， $a_0 = 10^{-5}(\text{m/s}^2)$  である．

式(5)において， $C_w(i) = 1.0$  とすれば振動加速度レベル  $L_a$  を求めることができる．

#### 5．評価結果

##### (1) 車体振動および人体振動に基づく評価

表-6 は，測定ケース FA, RA における各方向の振動加速度実効値  $a_{r.m.s}$ ，周波数加重加速度実効値  $a_w$ ，振動加速度レベル  $L_a$ ，振動レベル  $L_w$  の一覧である．

y 軸方向の諸量については後輪の振動加速度実効値が前輪の 1.6 倍と差があるが，x 軸方向と z 軸方向の諸量については前輪と後輪でほぼ一致した値となっている．人体の振動感覚補正の影響は，z 軸方向が最も小さく，後輪の y 軸方向が最も大きい．

表-6 評価結果 (FA, RA)

	前輪			後輪		
	x	y	z	x	y	z
$a_{r.m.s} (\text{m/s}^2)$	2.26	1.88	3.84	2.31	3.10	3.68
$a_w (\text{m/s}^2)$	0.63	0.34	1.48	0.61	0.46	1.49
$L_a (\text{dB})$	107	105	112	107	110	111
$L_w (\text{dB})$	96	91	103	96	93	103

表-7 は，前・後輪の各方向の振動レベルについて車いすの走行速度による違いを示したものである．

表-7 走行速度による振動レベルの違い

走行速度 (km/h)	前輪 (dB)			後輪 (dB)		
	x	y	z	x	y	z
3.5	93	88	100	93	91	99
4.0	95	90	101	93	92	101
5.0	96	91	103	96	93	103

車いすの振動を振動レベルで表した場合，走行速度 3.5～5.0km/h の範囲では振動レベルの値はいずれの方向も 2～4dB の変化となっている．車いすの平均速度が 1.1m/s (= 3.96km/h) である<sup>9)</sup>ことから，これらの値は平均速度で走行する車いすの振動レベルと考えることができる．また，旧環境庁の「振動による影響と振

動レベルの関係」<sup>10)</sup>と比較すると、いずれも 80dB 以上で人体に有意な生理的影響が生じ始めるレベルに対応する。

## (2) 全身振動暴露限界による評価

表-7 に示した振動レベルについて、ISO2631 (1978) 「全身振動の暴露基準」を用いて、車いす振動の評価を行った。

ISO2631 「全身振動の暴露基準」は、1 日に許容される鉛直振動と水平振動の暴露量の評価基準を加速度実効値と周波数の関係で示したものである。1 日に許容される暴露時間は、測定データを 1/3 オクターブバンドまたはそれ以下の狭帯域フィルターで分析した結果と評価基準との比較、あるいは、オーバーオール周波数の値（周波数加重加速度実効値、振動レベル）と 5Hz（垂直振動）、1.6Hz（水平振動）における基準基準との比較により、決めることができる<sup>11)</sup>。

図-7 は、ISO2631 (1978) 「全身振動の暴露基準」に表-7 に示した 4.0km/h 走行時の後輪の振動レベルをプロットしたものである。図中の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向の振動レベルを表す。

1 日の振動暴露限界は  $z$  軸方向の振動が約 1 時間、 $y$  軸方向の振動が約 4 時間、 $x$  軸方向の振動が約 3 時間となり、本研究で測定した路面の凹凸は 1 日に 1 時間以上の時間の走行には適さない路面であるという評価結果となる。

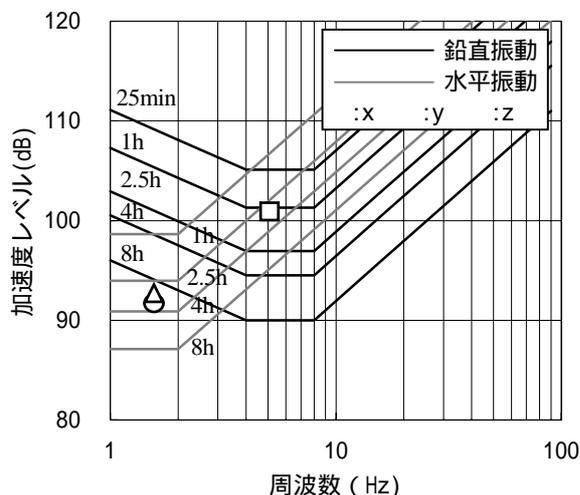


図-7 全身振動暴露限界による評価<sup>11),12)</sup>

## 6. まとめ

歩道路面凹凸の評価指標の一つとして車いす振動に着目し、長方形のインターロッキングブロックがヘリンボンボンに敷設された路面を走行する車いすにつ

いて 3 軸方向の振動加速度を測定した。測定結果を分析して基本特性を明らかにするとともに、車体振動と人体振動の観点から路面凹凸の評価を試みた。

その成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 車いすの振動加速度応答の卓越周波数は、ブロックの目地間隔と走行速度から求められる周波数の整数倍とほぼ一致する。
- (2) 車いすの振動加速度実効値は前・後輪とも鉛直方向の値が最も大きく、進行方向および横方向の値も鉛直方向の 1/2 以上の値を示す。
- (3) 走行速度が増加すると振動加速度実効値は線形的に増加し、走行速度の影響は鉛直方向が最も顕著である。
- (4) 乗員の重量が減少すると後輪の振動加速度実効値は増加する。
- (5) 測定を行った路面の凹凸は車いす乗員の人体に有意な生理的影響が生じ始めるレベルの振動を車いすに生じさせ、1 日に 1 時間以上の走行には適さないと評価できた。

今後は、1997 年に改定された ISO2631-1 による評価を試みるとともに、各種路面における車いす振動の測定および車いす乗員の乗り心地調査を行い、路面性状と車いす振動の関係、車いす振動による評価結果の妥当性、等について検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局企画課：道路の移動円滑化整備ガイドライン，大成出版社，pp.21-78，2003.
- 2) 牧恒雄，竹内康，松田誠：歩道の凹凸評価方法に関する研究，第 1 回舗装工学講演会論文集，pp.151-158，1996
- 3) 坂口陸男，秋山哲雄：各種舗装材料の車いす走行時の振動に関する基礎検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，-94，2000
- 4) (社) 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，技報堂出版，p.84，1996.
- 5) 松本泰尚，M. J. Griffin：鉛直振動暴露時の人体動的応答特性に関する研究，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.185-201，2002.
- 6) 日本規格協会：JIS C 1510(1977) 「振動レベル計」
- 7) (社) 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，技報堂出版，p.23，1996.
- 8) M. J. Griffin：Handbook of Human Vibration, Academic Press, p.478，2003
- 9) 国土交通省道路局企画課：道路の移動円滑化整備ガイドライン，大成出版社，p.81，2003.
- 10) (社) 計量管理協会：騒音と振動の計測，コロナ社，p.74，1990.
- 11) (社) 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，

技報堂出版 , pp.91-92 , 1996.

pp.74-76 , 1990.

12)(社)計量管理協会：振動と騒音の計測，技報堂出版，

## STUDY ON UNEVENNESS EVALUATION OF SIDEWALK PAVEMENT WITH VIBRATION ACCELERATION OF WHEEL CHAIR

Miyoshi OKAMURA and Naohiro FUKADA

Unevenness of sidewalk pavement was evaluated by using of the acceleration of front and rear wheel of a wheelchair. At first, vibration accelerations of running wheelchair were measured according to the orthogonal axis  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , and basic characteristics of the wheelchair and effects of wheelchair speed and weight of seated persons were revealed. Secondly, vibration level of the wheelchair was calculated by considering the frequency-weighted acceleration values. The wheelchair vibration and the comfort of seated persons were evaluated according to ISO2631(1978). As a result, it became clear that unevenness of the sidewalk affects seated person's health.