

## 多段階強度 2 方向衝撃試験によるスポーツサーフェスの緩衝特性

湯川 治敏<sup>\*1</sup>, 植田 剛志<sup>\*2</sup>, 河村 庄造<sup>\*3</sup>

### Shock Attenuation Properties of Sports Surfaces by Using Multi-intensity Two-dimensional Impact Test

Harutoshi YUKAWA<sup>\*1</sup>, Takeshi UEDA and Shozo KAWAMURA

<sup>\*1</sup> Aichi University, Faculty of Regional Policy  
1-1 Machihata, Toyohashi, Aichi, 441-8522 JAPAN

Shock attenuation property of sports surfaces is especially important not only for the athlete's performance but also for injury prevention. To evaluate the properties of the sports surfaces, some sports governing bodies often adopt friction tests and shock attenuation tests to determine the horizontal and vertical characteristics, respectively. Although the diagonal impacts are often observed in athletic sports, shock attenuation test treats only the vertical impact test. Therefore we developed a two-dimensional impact test device for examining the two-dimensional cushioning characteristics of sports surfaces in previous studies. To produce a simultaneous two-dimensional force against a test specimen, we incorporated a parallelogram linkage in the measuring system. In this study, two kinds of cushioned and an non-cushioned impact tests were examined to calculate the FR (Force Reduction) values not only in vertical but also in horizontal impact force. And the maximum deformations of impact tests were also acquired by the high-speed video analysis. As the results, both of vertical and horizontal impact forces which varied with initial impact angle and drop height were well represented by quadratic surface. Therefore vertical and horizontal FR value of two kinds of surface were calculated from the experimental maximum force and estimated impact force with the same height and initial angle. Furthermore, the horizontal maximum deformations are strongly related to the initial angle of the impact force because the horizontal impact force increases sharply with increasing the initial angle of the impact.

**Key Words** : Sports Surface, Shock Attenuation, Muti-Intensity Two-Dimensional Impact Test, Force Reduction

#### 1. 緒 言

一般にスポーツサーフェスと呼ばれる人工芝や体育館用マット、陸上競技場等に用いられているウレタン系舗装材等には大きく二つの役割があると考えられる。そのひとつはプレーヤーが高いパフォーマンスを発揮出来るようにすることであり、他方は怪我や障害から可能な限りプレーヤーを守ることにある。一般に、硬いサーフェスほどパフォーマンスの発揮をするためには都合が良いが硬すぎるサーフェスは身体への衝撃が大きくなり怪我や障害の原因となる可能性が高くなると考えられる。つまり、パフォーマンスの発揮と安全性の確保は相反する性質のものであり、これ故サーフェスの緩衝性を規定する様々なテストが考案され、各競技団体が使用するプレーイング・サーフェスにおいて特定の試験における基準値の範囲内に収めるよう定められている。例えば I.A.A.F. (国際陸上競技連盟) では、鉛直方向に関してはある特定の測定器による緩衝性能試験および最大変位試験が規定され、水平方向の摩擦係数のテストとしては Portable Skid Resistance Test や Skiding Resistance Test 等が規定されている<sup>(1)</sup>。これらの試験は再現性が高く、また測定された数値による評価も行い易いことが利点である。しかし、ほぼ等しい衝撃力を発生する 2 組のばね-質量系を全く同じサーフェスに落下させた場合の衝撃力の減衰率を比

<sup>\*1</sup> 正員, 愛知大学 (〒441-8522 愛知県豊橋市町畑町 1-1)

<sup>\*2</sup> 豊橋技術科学大学 機械工学課程

<sup>\*3</sup> 正員, 豊橋技術科学大学 機械工学系

E-mail: yukawa@aichi-u.ac.jp

較してみると緩衝性能が全く異なる結果となる。上記の緩衝性テストは人間の着地動作等で発生する衝撃波形を参考に質量、ばね定数、落下速度等を規定しているが、同じ衝撃波形でもそれを生じさせる力学的要素の組み合わせによって緩衝性が異なってしまうことが判る。つまり、これらの試験結果はある特定のばね-質量系に対する緩衝性能でしかなく、さまざまな条件が考えられる実際の運動状況を十分に考慮しているとは言えない。しかし、様々な衝撃条件を実際のばね-質量で実現するには非常にコストが掛かる。そこで緩衝性を様々な条件によって評価が可能となるよう、スポーツサーフェス等のモデル化が小林ら<sup>(2)(3)(4)</sup>により行われ、これらの研究により鉛直方向については高い同定精度のモデルが提案されてきた。しかし、実際のスポーツ活動において鉛直方向のみの衝撃は非常に稀であり、水平方向の衝撃に対してもサーフェスの変形による緩衝や滑りによる緩衝も考えられる。しかし、現存の試験では水平方向に関してはある特定条件の動摩擦係数を測定するのみでありサーフェス自体の緩衝性や滑りによる緩衝性を総合的に判断されていない。つまり、現状の Portable Skid Resistance Test ではサーフェス表面に対してある一定の速度で接触するが荷重はほとんど無く、逆に Skidding Resistance Test では一般的な動摩擦係数であるため荷重はかかっているにもかかわらずほとんど速度が生じていない状況での試験となる。筆者らの研究<sup>(5)</sup>では後者の様な一般的な動摩擦係数の結果と、ある程度速度があり、かつ荷重もかかるような衝撃的な試験での摩擦係数を比較した場合、滑り始めの角度に大きな違いがあることが判明した。また、滑りによる緩衝性は再現性が低くなりがちであり、定量的に捉えにくい。そこで本研究ではスポーツサーフェス等の緩衝材における2次元緩衝性能を検討するために、既に開発されている2方向衝撃試験器を利用し、センサ下部とサーフェスの間に緩衝性のない両面テープにて固定することにより、滑りの影響を無くした上で2方向衝撃の緩衝性の検討を行った。また、従来の衝撃試験器における落下重錘の質量を大きくすることにより、より広い範囲の初期衝撃角度、衝撃力に対する緩衝性能について検討した。

## 2. 2方向衝撃試験器について

本研究で改良した2方向衝撃試験器の概要を図1に示す。試験器はレーザー変位センサ、ソレノイド、落下重錘(5.6 kg)、平行四辺形リンク、センサユニット、リニアガイド、鋼材フレームによって構成されており、センサユニット下部にスポーツサーフェスを置いて実験を行う。更に本研究では上述のように滑りによる影響をなくすため、センサ下部とサーフェスの間に緩衝性のほとんど無い両面テープを用いてずれが生じないように接着した。2方向衝撃試験器では重錘、平行四辺形リンクは別々のリニアガイド上をスライドし、重錘が平行四辺形リンクに衝突することによって衝撃力を発生させる。つまり、平行四辺形リンクを使用することによって落下重錘からの衝撃力 $F$ を鉛直方向 $f_y$ 、水平方向 $f_x$ の2方向に分解する。その衝突によって生ずる衝撃力が衝撃伝達部を通してセンサユニットのひずみゲージ部(図1B, C)に衝撃を伝え、加速度センサ(図1D)によってセンサユニット加速度が測定される。また、鉛直衝撃力 $f_y$ 、水平衝撃力 $f_x$ の最大値は重錘落下高さ $H$ に、衝撃力の割合は初期角度 $\theta$ に依存する。また、それぞれ重錘落下高はレーザー変位センサによって測定し、初期角度はセンサ側方から撮影したハイスピードビデオ映像(2000コマ/秒)から算出し、更に鉛直、水平方向の最大変位についてもビデオ映像を用いて測定した。重錘の落下に際しては一定の落下条件となるようソレノイドの電磁力にて重錘を保持した後、徐々に印過電圧を下げることによって重錘を解放した。図2(a)に2方向衝撃試験器に全体写真、(b)には角度測定に用いたハイスピードビデオカメラの映像を示す。

図1中、試験材料に加わる衝撃力 $f_x, f_y$ は、落下重錘の衝突によって生じたセンサユニットを水平・鉛直方向に押す力 $f_x, f_y$ から平行四辺形リンクおよび衝撃伝達部を除くセンサユニット質量(0.285kg)にそれぞれの加速度成分を掛けた慣性力分を差し引くことによって算出することが可能となる。

## 3. 試験材料について

本研究で使用した試験材料の特性を表1に示す。表1中の硬さは島津製作所製ゴム硬度計デュロメータタイプA型による硬度である。試験材料Mは厚さ14mmでI.A.A.F.の規格に適合したウレタン系サーフェスであり表面はエンボス加工、底面は均等な格子状加工が施されている。試験材料Oは厚さ12.5mmであり、実際の施工時には表面に更に加工を加えるが試験材料として提供頂いたため、表面は平滑面となっている。両試験材料とも試験

材料底面と衝撃試験器のフレーム部および試験材料表面とセンサユニット部底面の間は緩衝性のほとんど無い両面テープによって接合され、測定範囲内では粘着面が剥がれることはほとんど無かった。また、試験材料の大きさは約 20 cm 四方であり、センサユニットの底面積と比較すれば十分に大きい為、試験材料端部の特性が緩衝性能に影響を与えることはない。

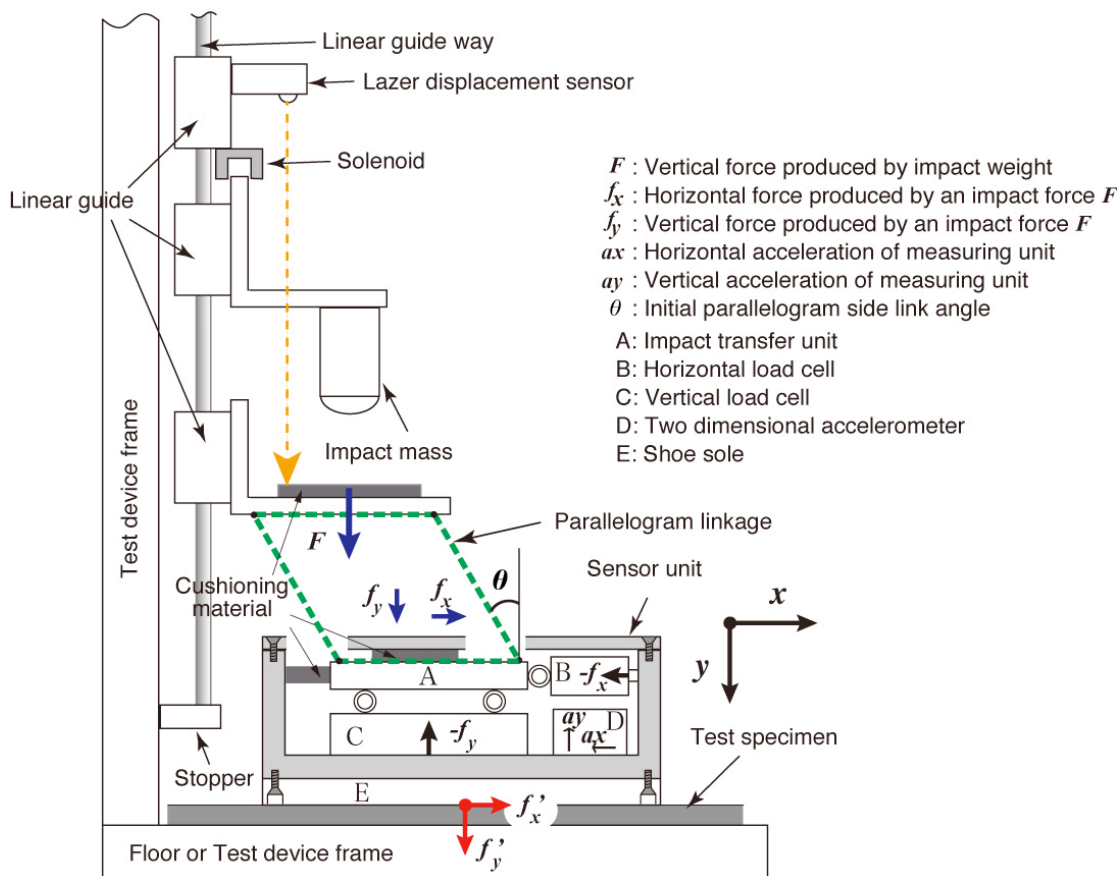


Fig.1 Two-dimensional impact tester

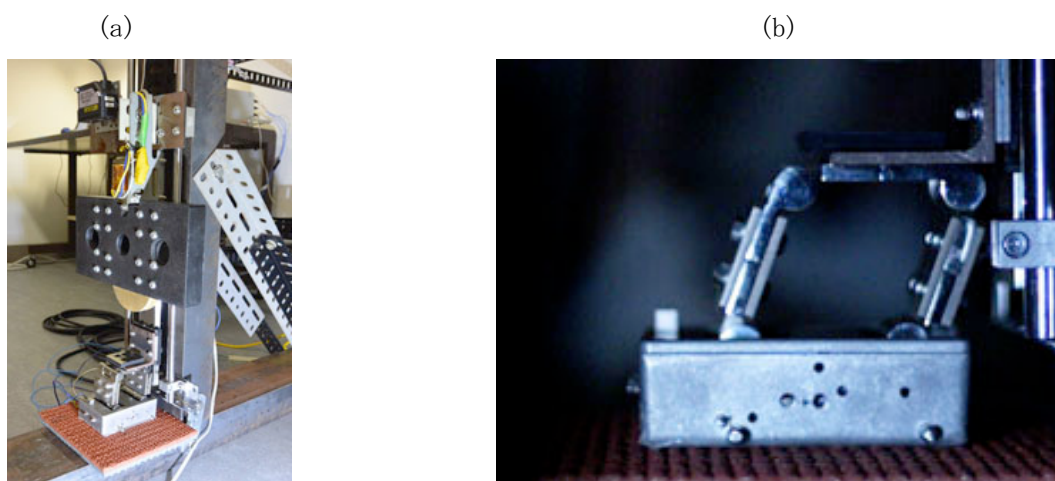
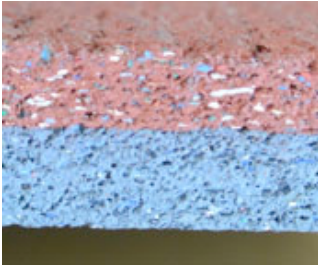
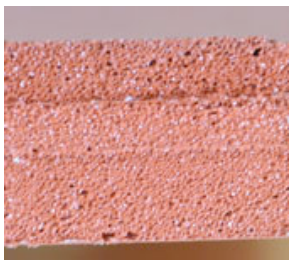


Fig.2 Whole vies of the two-dimensional impact tester (a) and the sensor unit (b).

Table 1 Specifications of the specimens

Test Specimen	Specimen M	Specimen O
Thickness [mm]	14.0	12.5
Hardness Top [point]	45.2	47.9
Hardness Bottom [point]	40.96	39.3
Cross section		

#### 4. 多段階強度 2 方向衝撃試験

##### 4・1 FR 値 (Force Reduction Value) について

DIN および I.A.A.F.の試験器においては鉛直方向緩衝性の指標として  $FR$  値が用いられる。これはある衝撃を緩衝性のないコンクリートや床等に与えた際の衝撃力のピークを  $F_{max}$ 、同じ衝撃を緩衝材上で与えた際の衝撃力のピークを  $f_{max}$  とした際に式(1)で与えられる。

$$FR = \left(1 - \frac{f_{max}}{F_{max}}\right) \times 100 \quad (1)$$

しかし、この指標は鉛直方向の緩衝性能評価として定義されたものであり、水平方向の緩衝性能評価が出来ない。そこで筆者らの過去の研究<sup>6)</sup>において、水平方向、鉛直方向別々の  $FR$  値を提案した。式(2)、(3)にその定義を示す。

$$VFR(\theta, H) = \left(1 - \frac{f_{y_{max}}(\theta, H)}{F_{y_{max}}(\theta, H)}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$HFR(\theta, H) = \left(1 - \frac{f_{x_{max}}(\theta, H)}{F_{x_{max}}(\theta, H)}\right) \times 100 \quad (3)$$

$VFR$ (Vertical Force Reduction)は式(1)で示した I.A.A.F.等で定義された  $FR$  値とほぼ同様であるが、 $(\theta, H)$ は初期角度  $\theta$ 、落下高  $H$  における鉛直方向の  $FR$  値を示す。従って、式(2)内における  $F_{y_{max}}(\theta, H)$  および  $f_{y_{max}}(\theta, H)$  はそれぞれ初期角度  $\theta$ 、落下高  $H$  における緩衝材無しの最大衝撃力、緩衝材有りの最大衝撃力を示す。同様に  $HFR(\theta, H)$ 、 $F_{x_{max}}(\theta, H)$  および  $f_{x_{max}}(\theta, H)$  はそれぞれ初期角度  $\theta$ 、落下高  $H$  における水平方向の  $FR$  値、緩衝材無しの最大衝撃力および緩衝材有りの最大衝撃力を示す。

##### 4・2 衝撃試験条件について

昨年度の報告では落下重錘の質量は約 3 kg であり、また、試験材料とセンサユニット間の接着もしていなかったために衝撃試験条件が限定されていたが、本研究では落下重錘の質量は 5.6 kg と昨年度の約 2 倍となり、更に試験材料とセンサユニット間は両面テープにて結合しているため、広範囲での試験条件が可能である。具体的には試験材料 M, O それぞれについて初期角度  $\theta$  は 5 度から 35 度まで 6 段階、落下高は 20 mm ~ 200 mm まで 8 段階の衝撃試験を行った。更に同一条件における試験材料無しの衝撃力を推定するために衝撃試験器のフレーム

に本研究で使用した両面テープを用いてセンサユニットを固定させた状態で初期角度 10 度～30 度, 落下高 20 mm ～ 200 mm まで 4 段階の衝撃試験を行った。

### 4・3 VFR および HFR の算出方法

4・1 で示したように VFR および HFR を算出するには試験材料を用いたそれぞれの衝撃試験の  $(\theta, H)$  と同一条件における試験材料無しの最大衝撃力が必要である。しかし、衝撃試験器の構造上、正確に  $(\theta, H)$  を指定した衝撃試験は非常に困難である。従って、試験材料無しの衝撃力を  $(\theta, H)$  の 2 変数から推定可能な 2 次曲面としてパラメータ同定し、実際の実験で測定された  $(\theta, H)$  から最大衝撃力  $F_{x\max}$ ,  $F_{y\max}$  を推定することで VFR および HFR を算出した。図 3(a),(b) に試験材料無しの各衝撃試験の  $(\theta, H, F)$  から得られた推定の 2 次曲面とそのデータポイントを示す。(a) は鉛直方向の推定 2 次曲面であり、(b) は水平方向の推定 2 次曲面である。式(4), (5) はそれぞれ鉛直方向、水平方向の最大衝撃力推定 2 次曲面を示す。図中赤丸は測定されたデータそのものであり、青丸は 2 次曲面の推定によって同じ  $(\theta, H)$  から算出されたデータである。図から明らかなように鉛直、水平とも既存データを良く推定できているため、実際の実験値  $(\theta, H)$  から試験材料無しの最大衝撃力を精度良く推定することが可能であると考えられる。従って、この値を使うことにより各衝撃試験における VFR, HFR を算出することが可能となる。

$$F_{y\max} = -600.164 + 29.661 H - 0.0345945 H^2 + 65.2267 \theta - 0.235006 H \cdot \theta - 1.22772 \theta^2 \quad (4)$$

$$F_{x\max} = -365.425 + 4.99622 H - 0.0171733 H^2 + 17.9906 \theta + 0.212821 H \cdot \theta - 0.137614 \theta^2 \quad (5)$$

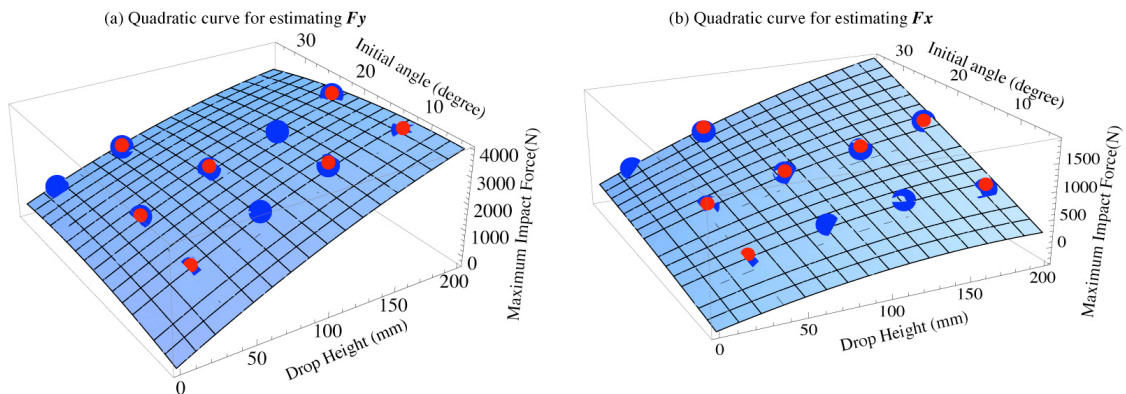


Fig.3 Quadratic curve for estimating  $F_{y\max}$  and  $F_{x\max}$

### 4・4 水平・鉛直最大圧縮変位の算出

センサユニットには 2 方向の加速度計が装着されており、衝撃前は完全な静止状態となっているため、衝撃期間中のセンサユニットの速度、変位は 2 方向の加速度信号を積分することで得られる。また、本研究では加速度センサの確認のため、センサユニット側方からハイスピードカメラによる毎秒 2000 コマでの撮影も実施した。加速度の 2 階積分値とハイスピードビデオカメラでの変位を比較するとゼロレベルの調整が必要な試技もあったが概ね一致していた。そこで、今回はビデオ映像から測定した水平・鉛直最大圧縮変位を用いる。

## 5. 結果および考察

### 5・1 鉛直方向緩衝性能 VFR について

図 4 に試験材料 M および O における VFR(鉛直方向緩衝性能)を示す。緑の丸は試験材料 M のデータを示し、青の丸は試験材料 O のデータを示す。また、図中の 3 つの 3 次元グラフは全て同じグラフを視点を変えて掲載してある。VFR は式(4)で求めた試験材料が無い場合の各試技における最大衝撃力に対する試験材料がある場合の最

大衝撃力の減少率として算出される。緩衝性能はサーフェスで一定ではなく入力条件が異なれば様々な *VFR* の値が観察される。従って衝撃力の変化を伴う落下高や初期角度の変化によっても *VFR* 値が異なるため、様々な条件における *VFR* を示すには 3 次元グラフが最も適当な表示方法であると考えられる。図から明らかのように試験材料 M の方が全般的に *VFR* が高く鉛直方向緩衝性能が高いことが判る。変化の特徴としては初期角度が大きくなるほど、また、落下高が大きくなるほど *VFR* が大きくなり緩衝性が良くなることが判る。また、この傾向は試験材料 O についても同様の傾向を示す。但し、両試験材料の差は初期角度が大きいほど、また、落下高が大きいほど拡大する傾向に有り試験材料の特性が表れていると言える。また、両試験材料とも角度が小さく落下高が低い試技においては負の *VFR* の値を示している。これは試験材料が無い場合の最大衝撃力を推定する為のデータが十分な範囲、特に衝撃力の小さな範囲で充分に行われていないことや現在は加速度計をセンサユニット先端に装着しており、振動を拾いやすい状態になっているため、各試験材料の実権から得られた最大衝撃力を計算する際に加速度の振動成分が影響している可能性がある。表 1 に示すようにゴム硬度計の値では試験材料で大きな差が見られる訳ではなく、底面側ではむしろ試験材料 O の方が柔らかい傾向にあるにもかかわらず鉛直方向で緩衝性能の差が生じたのは試験材料表面の構造にあると考えられる。試験材料 M は表面をエンボス加工してある為、エンボスの隆起が単独でも緩衝作用をすることが可能である。それに対し、試験材料 O では表面は一様な仕上げになっておりエンボスのような局所的な振る舞いは出来ず常に表面が連結した状態で振るまいが発生する。このため硬度計では差があまり認められないが試験材料としては大きく異なった振るまいをすると考えられる。

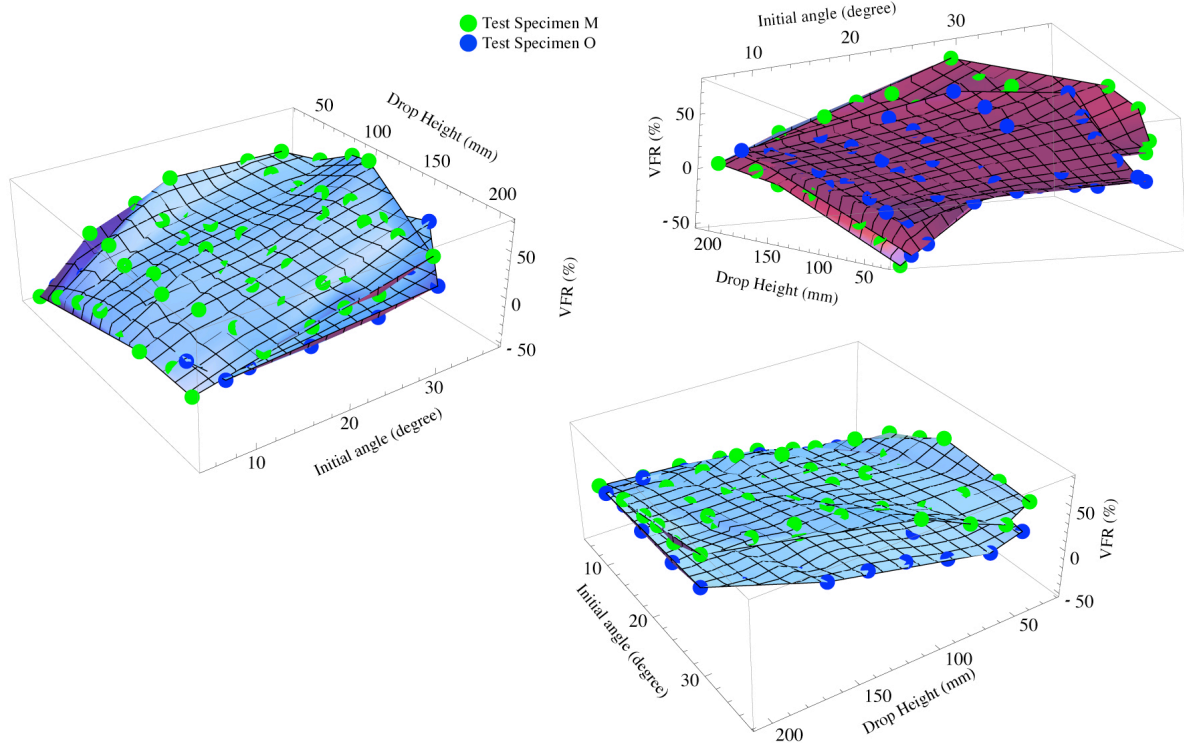


Fig.4 Comparison of VFR (Vertical Force Reduction) between two test specimens. These three figures are the same one with different view point

## 5・2 水平方向緩衝性能 HFR について

図 5 に試験材料 M および O における *HFR*(水平方向緩衝性能)を示す。図 4 と同様緑の丸は試験材料 M、青の丸は試験材料 O を示す。*HFR* も *VFR* 同様試験材料 M が全般的に良い緩衝性能を示してはいるが試験材料 O との差はほとんど無く、また、*VFR* では落下高が高くなり衝撃力が大きくなるほど 2 つの試験材料の緩衝性の差は大きくなっていったが *HFR* に関しては特に顕著な差は見られない。さらに、初期角度が小さく落下高が低い場合には

双方とも *HFR* 値が負の値を示すケースが多く、現段階では試験条件の不具合によるものかあるいは試験材料の特性そのものなのかは判断できないためさらなる検討が必要である。

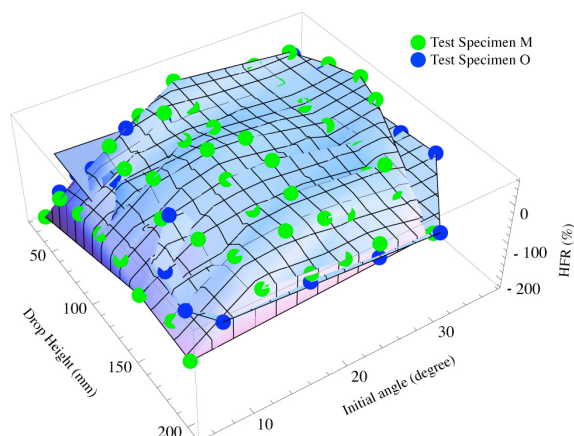


Fig.5 Comparison of HFR (Horizontal Force Reduction) between two test specimens.

### 5・3 鉛直・水平方向における最大衝撃力および最大変位について

図 6(a)は各初期角度における鉛直方向の最大変位および最大衝撃力を示す。また、図 6(b)は水平方向の最大変位および最大衝撃力を示す。双方とも緑の丸は試験材料 M、青い丸は試験材料 O を示している。また、初期角度については便宜上 5 度から 35 度までの 6 グループに分けてあるが正確にその角度に設定できている訳では無く初期角度の影響を検討するためにこのようなグループ分けを行った。更に、各初期角度群での落下高は約 25 mm か約 200 mm の範囲内で 8 段階の試験を行っている。図から明らかなように、当然のことながら両試験材料とも初期角度が大きくなるにつれ最大衝撃力の鉛直成分は小さくなり、逆に水平方向成分は大きくなる。また、緩衝性能の高かった試験材料 M の最大衝撃力は鉛直・水平方向とも全般的に試験材料 O を下回っており、図 4 に示したように同じ初期角度と落下高であれば試験材料 M の方が最大衝撃力が小さくなる。

次に、最大変位に着目すると鉛直方向の最大変位は初期角度が大きくなるにつれ若干小さくなる傾向にあるがあまり大きな変化はない。しかしながら、水平方向の最大変位は初期角度の変化に伴いかなり大きく変化することが判る。初期角度 5 度における試験材料 M の平均最大変位は 0.20 mm であるのに対し初期角度 35 度では 2.34 mm となっている。同様に試験材料 O でも初期角度 5 度では 0.26 mm であるのに対し 35 度では 2.10 mm である。水平方向の緩衝性能に関しても若干ではあるが試験材料 M の方が *HFR* は大きい為、最大変位についても M の方が若干大きい傾向にあった。初期角度が大きくなるにつれ、水平方向最大変位は大きくなることが予想できたが、鉛直方向最大変位にあまり大きな差が生じないことを確認できた。

## 6. 結 語

本研究では筆者らの開発した 2 次元衝撃試験器を改良することでより大きな衝撃力による衝撃試験が実施可能となった。また、2 種類のウレタン系スポーツサーフェスに対し、センサユニットと試験材料の間を緩衝性の無い両面テープを用いて接着することで広範囲の衝撃力と初期角度による 2 方向衝撃試験を実施した。結果を以下に示す。

- 1) 緩衝性の無い衝撃力は落下高と初期角度を 2 変数とする 2 次曲面によって推定可能であった。
- 2) 鉛直方向緩衝性能を示す *VFR* は初期角度が大きくなるほど、また、落下高が大きくなるほど *VFR* が大きくなり緩衝性が良くなることが判明した。
- 3) 水平方向緩衝性能を示す *HFR* は 2 つの材料で大きな差は認められなかった。
- 4) 水平方向最大変位は初期角度に大きく影響を受けることが判明した。

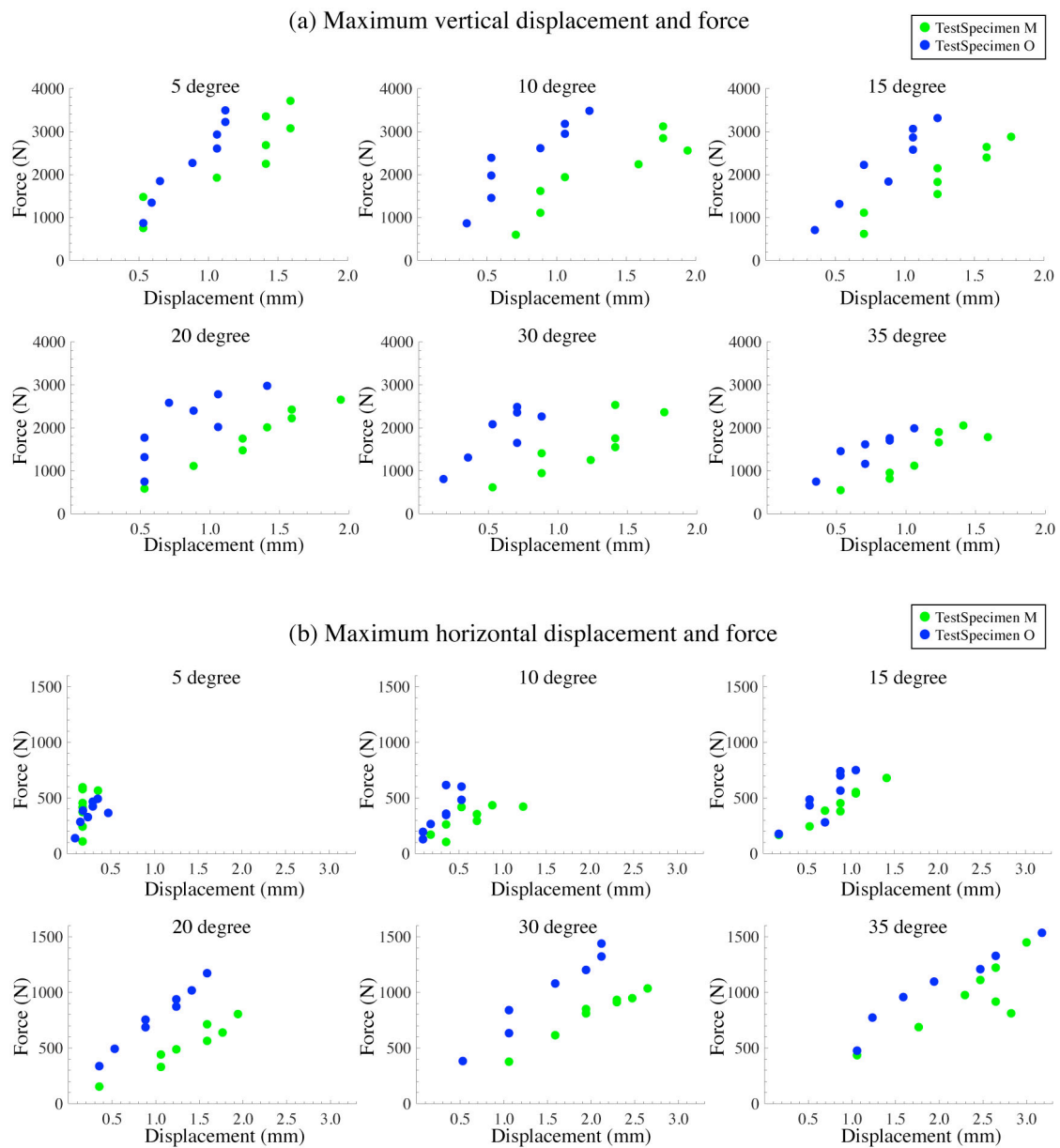


Fig.6 Comparison of maximum vertical displacement and vertical force in each test specimen (a) and horizontal maximum displacement and horizontal force in each test specimen (b).

## 文 献

- (1) I.A.A.F., IAAF Track and Field Facilities Manual 2012 Edition, 2012.
- (2) 小林一敏, 湯川治敏, 多段階強度衝撃法による非線形系の同定法 (第1報, 多項式形非線形 Voigt モデルの妥当性), 機論, 60-573, C(1994), 75.
- (3) 小林一敏, 湯川治敏, 多段階強度衝撃法による非線形系の同定法 (第2報, ゴム粘弾性の連続変化非対称粘性多項式モデル), 機論, 60-573, C(1994), 83.
- (4) K. Kobayashi and H. Yukawa, Identification of the Exponential Function Type Nonlinear Voigt Model for Sports Surfaces by Using a Multi-Intensity Impact Test, JSME:Journal of System Design and Dynamics 2011;Vol.5,No.6:1326-1336.
- (5) H.Yukawa, S.Kawamura, K.Kobayashi: Two-dimensional cushioning characteristics of sports surfaces, Sports Technology, February 2010, 3(1):26-33.
- (6) 湯川治敏, 安妻 亮, 河村庄造, 感本広文, 小林 一敏, スポーツサーフェスにおける鉛直方向,水平方向緩衝性の比較, 日本機械学会, シンポジウム講演論文集(No.12-39), 236-241, 2012.