

衝撃試験法によるロングパイル人工芝充填部の緩衝特性

湯川 治敏^{*1}, 藤本 雄太^{*2}, 河村 庄造^{*3}

Shock absorbing properties of long pile synthetic turf by using impact test

Harutoshi YUKAWA^{*1}, Yuta FUJIMOTO and Shozo KAWAMURA

^{*1} Aichi University, 1-1 Machihata, Toyohashi, Aichi, 441-8522 Japan

The purpose of this study is to investigate the shock attenuation properties of long pile synthetic turf filling unit. Two different types of specimens (turf in infill, volume ratio ; sand : rubber = 5:5 and 7:3), one type specimen (no turf in infill, volume ratio ; sand : rubber = 5:5) and five different areas of test foot were prepared. Multi-intensity multi-area impact tests (20 impact trials with different intensity are performed for each 5 different impact areas) were performed for considering the parameter identification and shock absorbing properties with simulation. As the results, we could not measure in no turf because test foot was buried in infill. But, Stable data were obtained in turf. Adaptation of exponential type nonlinear Voigt model is also possible for the sample of this study. However, identification accuracy was same as the previous study.

Key Words : Long pile synthetic turf, Exponential type nonlinear Voigt model, Shock absorbing properties

1. 結 言

近年、各種スポーツ団体が公式試合会場で天然芝と比較して維持管理が容易であるロングパイル人工芝の利用を認め始めており普及が顕著である。しかし、ロングパイル人工芝では靱帯損傷を起こす選手の割合が天然芝より多いという報告がある⁽¹⁾。サッカーやラグビー等では急激な方向転換を伴う動作やジャンプのような動作が多いためけがの要因はそれらの動作に起因するものと考えられている。サーフェスは硬く、反発特性に優れているほど、競技において高いパフォーマンスを発揮することができるが足や関節の負担が大きくなりけがを引き起こしやすくなる。そのため、日本サッカー協会ではその特性として耐久性、耐候性、選手に対する特性、ボールに対する特性などを規定している。特に選手に対する特性としては鉛直方向緩衝特性、衝撃に対する鉛直方向変位やトラクション、摩擦特性の値を規定している⁽²⁾。そのため、けがの発生率を抑えるためにはロングパイル人工芝の応答特性を知り緩衝性を評価することが重要である。現在、衝撃特性や鉛直方向変位に関する試験ではウレタン系走路などに用いられている衝撃特性試験 (DIN18032) が採用されている。DIN試験は特定の質量-ばね系を落下させた場合の衝撃力の減衰率を評価の指標としている。しかし、運動者がスポーツサーフェス上で運動を行う場合、運動者によって衝撃力の強さ、作用時間、衝突速度、接触面積、接触面形状などは大きく変化する。これらの条件に対する緩衝材の応答特性を知ることは、スポーツサーフェスの緩衝性能の研究において重要であると考えられている。先行研究においてロングパイル人工芝に対して衝撃試験を行った場合安定したデータが得られなかった。そこで、表出部の芝は緩衝性に影響を及ぼすと考えられるがパラメータ同定の第一段階として表出部の芝を除き単純なサンプルのロングパイル人工芝充填部に対して多段階・多面積衝撃試験を行った。そして、すでに報告されている指数関数型非線形Voigtモデル⁽³⁾のパラメータ同定を行い、その精度の評価を行った。

^{*1} 正員, 愛知大学 (〒441-8522 愛知県豊橋市町畑町 1-1)

^{*2} 豊橋技術科学大学大学院 工学部

^{*3} 正員, 豊橋技術科学大学

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

2. 理 論

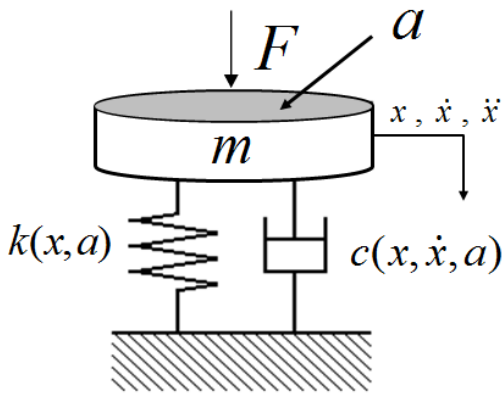
2・1 指数関数型非線形 Voigt モデル

図1に本研究で用いた指数関数型非線形 Voigt モデルを示す. 衝撃力 F が面積 a , 質量 m の衝撃伝達部を介して外力 f として試験材料に加えられたとき, 非線形弾性要素による反力 f_k と非線形粘性要素による反力 f_c を足し合わせることで外力 f を表すことができる. 式は以下に示す指数関数で表される. また, 粘性項は変形変位 x と変形速度 \dot{x} を変数に含めることでヒステリシスを表すことが可能である.

$$F - m\ddot{x} = f = f_k + f_c \quad (1)$$

$$f_k = \text{sign}(x)e^{k_0+k_1x+k_2a^\beta} |x|^{p_0+p_1x+p_2a^\gamma} \quad (2)$$

$$f_c = \text{sign}(\dot{x})e^{c_0+c_1x+c_2\dot{x}} |x|^{q_0+q_1x+q_2\dot{x}} |\dot{x}|^{r_0+r_1x+r_2\dot{x}} a^{s_0+s_1x+s_2\dot{x}} \quad (3)$$



a : impact area

F : force applied on the test foot

m : mass of test foot

x : displacement

\dot{x} : velocity

\ddot{x} : acceleration

$k(x, a)$: nonlinear elastic element

$c(x, \dot{x}, a)$: nonlinear viscous element

Fig.1 Exponential Function Type Nonlinear Voigt Model

2・2 パラメータの同定方法

接触面積 a と重錘の落下高を変更し衝撃試験を行う. 衝撃試験により各衝撃の衝撃力, 変形速度, 変形変位量の時系列データ対 (a, f, \dot{x}, x) を得る. まず, 1次同定として多段階にわたるそれぞれの時系列データをひとつにまとめ, その中から $\dot{x} = 0$ となるときの, 衝撃力, 変形変位量のデータを取り出す. 式(1), 式(2)より, f は f_k と a と x のみの式で表すことが出来る. よって, $\dot{x} = 0$ のときのデータを用いて最小二乗法により式(2)のパラメータ同定を行う. ただし, 各パラメータを同定する際には, 時系列データより得られる f_k と式(2)に含まれる β, γ を適当に与えて得られる推定の f_k との誤差を求める. そして, その誤差が最も小さくなる時のパラメータ $k_0, k_1, k_2, p_0, p_1, p_2, \beta, \gamma$ を採用する. 次に, 求められた f_k の値を用いて $f_c = f - f_k$ を求め, 最小二乗法により式(3)のパラメータ同定を行う. そして, 2次同定として1次同定で求めたパラメータを初期値とし非線形計画法の一つであるローゼンブロック法を行い, 全体の同定精度が良くなる値を求めパラメータを決定する.

2・3 同定精度の評価

本研究では, 多段階・多面積による衝撃試験について同定精度の評価を行う. 評価には相対標準誤差を用いる. 外力を f_i , 推定した外力を \hat{f}_i , 外力の時間平均を \bar{f} とする. 式(4)により, その強度の衝撃に対するモデルの同定精度を評価する. また, 多段階全体の平均を取った平均相対標準誤差 MeanRSE によって多段階モデルの総合的同定精度を評価する.

$$RSE = \frac{1}{\bar{f}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{f}_i - f_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

3. 実験方法

3・1 衝撃伝達部

本研究ではポリアセタール製のロッド付円柱を用いる。Test footは接触面積が異なる5種類(1590mm²~3959mm²)を用いる。Test footの接触面積，質量，厚さの詳細を表1に示す。

Table1 Spec of Test foot

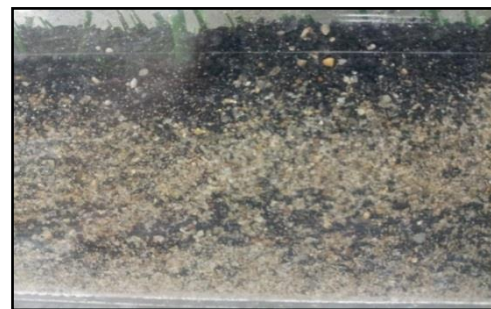
Test foot No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Impact Area [mm ²]	1590	2206	2780	3369	3959
Mass [g]	64	83	99	115	130
Thickness [mm]	20				

3・2 試験材料

本研究では図2(a)，(b)に示すような充填剤の容積比を変え硬さが異なり充填部に芝があるもの2種類を用いる。共に芝の長さは50mmで底に珪砂を6mm敷きその上に充填材を44mm充填し芝と充填剤の高さを揃えた。通常施工されている硬さのサンプルは混合比率(珪砂：ゴムチップ)5：5である。比較のため混合比率を7：3とし硬くしたサンプルも作成した。さらに，図2(c)に示すように充填部に芝がなく珪砂とゴムチップのみで混合比率5：5のサンプル1種類を用いて比較を行う。また，これらのサンプルは厚さ5mmの亚克力板で高さ60mm，縦横0.5mの容器を作成しその中に設置した。ロングパイル人工芝充填部の仕様を表2に示す。



(a) Normal 1



(b) Hard



(c) Normal 2

Fig. 2 Infill of long pile synthetic turf

Table2 Specification of the infill material in each sample

Test specimen	Length of yarn [mm]	Bottom layer sand [mm]	Top layer (44mm) Volume ratio of sand : Rubber chip
Normal 1	50	6	5 : 5
Hard	50	6	7 : 3
Normal 2	50(Height of the sand)	0	5 : 5

3・3 多段階・多面積衝撃試験

多段階衝撃試験器は図3に示すように落下重錘，衝撃計測部，衝撃伝達部（Test foot），試験材料で構成されている。これらの中心を合わせて設置する。また，衝撃計測部は荷重変換器，加速度変換器，変位計で構成されている。衝撃計測部に重錘を任意の高さから落下させて衝撃を与える。そのときの衝撃力，加速度，変位の時間的経過を測定する装置である。サンプル容器を安定した床面に置き，容器内に設置された人工芝充填部に対して多段階衝撃試験を行う。人工芝充填部の表面に Test foot を水平安定状態に設置する。さらに，Test foot のロッド上部にセンサーユニットを静止状態に設置する。試験材料 Normal 1, Hard に対して Test foot を No.1 から No.5 まで変化させ，さらに重錘（質量 5.3 kg）を 5 mm から 100 mm まで 5mm 間隔で 20 段階から落下させて衝撃試験を行った。Normal 2 に対しては Test foot No.4, No.5 を使用し実験を行った。衝撃により充填部の状態が変化する。したがって，衝撃を与える箇所を試技ごとに変更し，表面を均しながら試験を行う。また，(a) すべてのパラメータを初期値としパラメータ探索を行う，(b) 1 次同定で求めた f_k のパラメータを固定値として f_c のパラメータのみを初期値としパラメータ探索を行う 2 つの方法で 2 次探索を行いそれぞれの同定精度の違いを評価する。

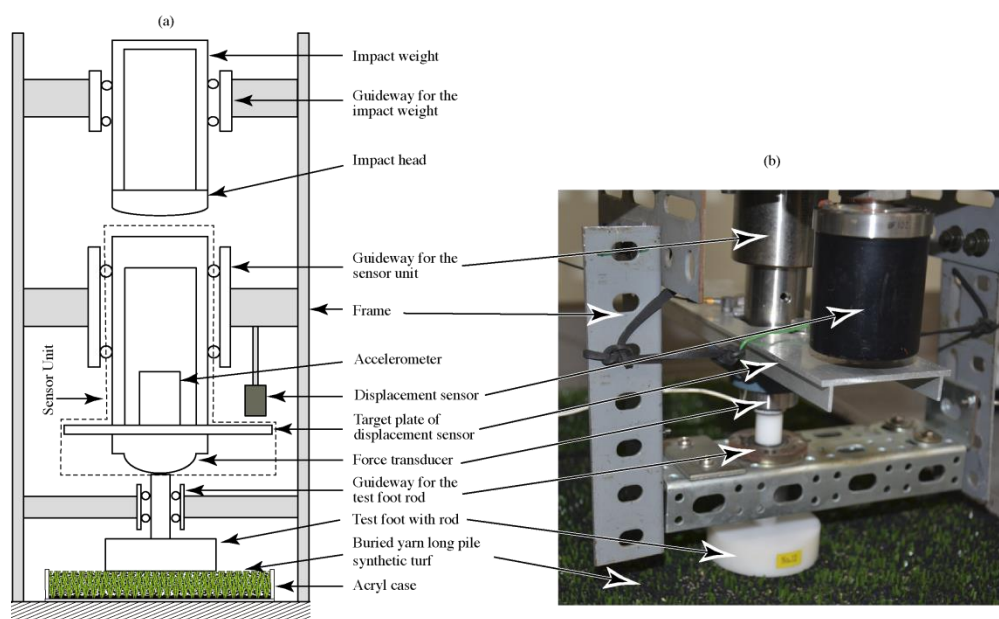


Fig. 3 Diagram of the impact test device and photo of the area around the sensor unit

4. 結 果

4.1 多段階・多面積衝撃試験によるパラメータ同定

Normal 2 に対して二つの Test foot (No.4, No.5) で実験を行った結果，比較的低い位置から重錘を落下させた場合においても図4に示すように Test foot が充填剤内に沈み込み測定ができなかった。Normal 1, Normal 2 共に表面の状態は同じである。しかし，Normal 1 では充填剤内の芝が壁となり充填剤の移動を抑え Test foot が沈み込むことを抑制していた。一方で，Normal 2 においては充填剤が移動することを抑制できなかったため Test foot が沈み込んでしまったと考えられる。また，測定できた範囲の衝撃力波形を図5に示す。図5より，充填部に芝があるサンプルと芝がないサンプルとでは衝撃特性が異なることが見て取れる。Normal 2 のサンプルでは，重錘の落下高が十分に確保できず広い範囲での測定ができなかったが，衝撃波形も本来のロングパイル人工芝と大きく異なるため本研究では，Normal 1 のような表出部に芝が出でおらずかつ充填剤内に芝があるサンプルを採用する。さらに，図6に $\{(f, x)\}'$ のデータ対および同定された f_k 曲線を示す。衝撃面積が大きくなるにつれ同程度の落下高によって生じる衝撃力は大きくなると予想されるが f_k 曲線はその通りの結果となっている。よって， f_k のパラメータが同定できたと考えられるため，各データ対における f_c を求めることが可能であると考えられる。

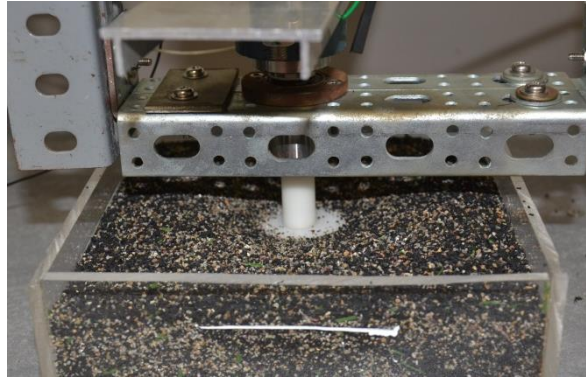


Fig. 4 Buried test foot after the impact in normal 2 test specimen

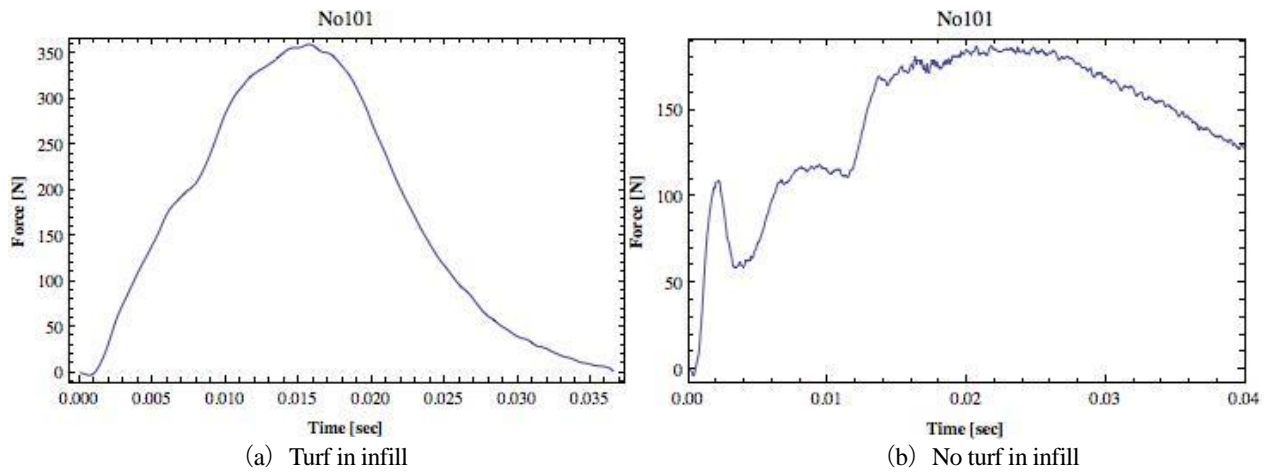


Fig. 5 Force in Normal 1 and Normal 2

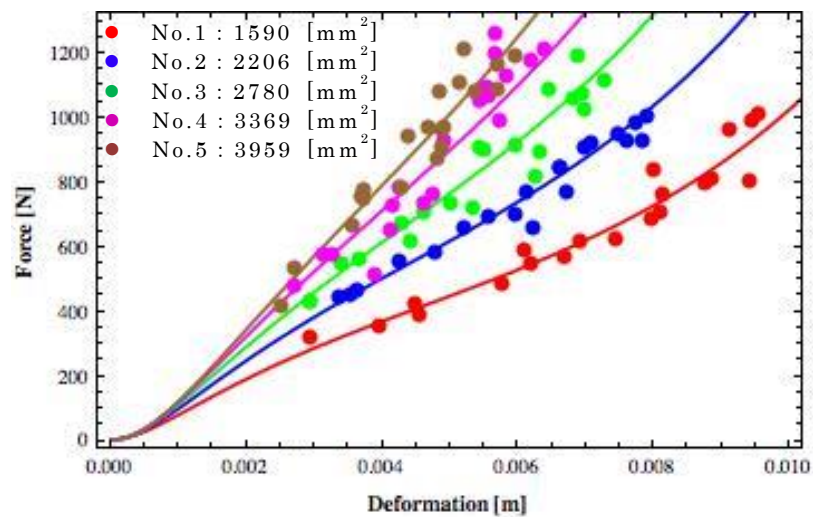


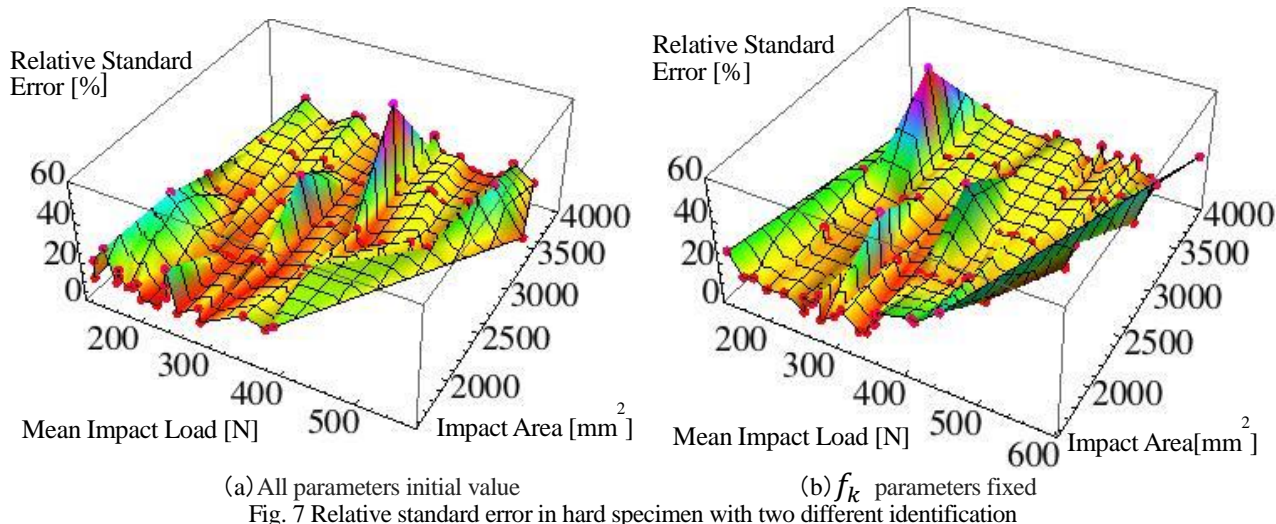
Fig. 6 Extracted data set for calculating elastic parameters in the primary identification and the estimated f_k curves in hard specimen

4.2 同定精度

2次同定によって求められたパラメータを用いた推定値のRSEを図7に示す。2次同定を行う際の条件の違いによる同定精度の違いの検証を行った。(a)すべてのパラメータを初期値としパラメータ探索を行った場合のRSEの最高は8.85%、最低は59.04%、平均は16.54%となった。また、(b)1次同定で求めた f_k のパラメータを固定し f_c のパラメータのみを初期値としパラメータ探索を行った場合のRSEの最高は7.95%、最低は57.84%、平均は16.28%であった。2次同定を行う際 f_k のパラメータを1次同定で求めたパラメータで固定した方が精度が向上していることが分かる。これは、一次同定では初めに f_k のパラメータを求めるため推定 f_k の値が実験値に近い値になるが、これを初期値とすることで値がずれてしまい精度が悪くなってしまったと考えられる。また、それぞれのTest footにおいて、衝撃力が大きくなるにつれ同定精度が低くなる傾向がみられる。さらに、同一Test foot内においても衝撃波形の形状が大きく異なる訳では無いにもかかわらず、同定精度が高い試技やかなり低い試技が有りばらつきが見て取れた。本研究では、表出部に芝が出ていないサンプルを用意し測定後、表面を均しながら実験を行ったため先行研究より比較的安定したデータを得ることが出来た。しかし、同定精度は先行研究と同等の値となった。(b)の方法で求めたパラメータを表3に示す。

Table3 Parameters acquired by secondary identification

Normal 1		Hard	
Parameter of f_k		Parameter of f_k	
k_0	9.26×10^0	k_0	1.68×10^1
k_1	1.48×10^2	k_1	1.15×10^3
k_2	-1.64×10^{-12}	k_2	6.79×10^1
p_0	7.00×10^{-1}	p_0	2.13×10^0
p_1	1.69×10^{-1}	p_1	3.2910^2
p_2	-9.79×10^{-18}	p_2	7.45×10^1
β	-4.38×10^0	β	4.27×10^{-1}
γ	-5.94×10^0	γ	9.58×10^{-1}
Parameter of f_c		Parameter of f_c	
c_0	5.31×10^0	c_0	-7.87×10^1
c_1	8.34×10^2	c_1	-2.15×10^0
c_2	7.01×10^0	c_2	2.97×10^{-1}
q_0	4.07×10^{-1}	q_0	-3.50×10^1
q_1	1.53×10^1	q_1	-4.41×10^{-1}
q_2	4.25×10^{-1}	q_2	3.31×10^{-2}
r_0	4.14×10^{-1}	r_0	7.37×10^1
r_1	1.92×10^2	r_1	3.41×10^0
r_2	2.56×10^0	r_2	4.34×10^{-1}
s_0	-1.26×10^{-1}	s_0	-3.57×10^0
s_1	1.03×10^2	s_1	2.05×10^{-1}
s_2	8.16×10^{-1}	s_2	1.62×10^{-1}



7. 結 言

本研究では、安定したデータを測定するために表出部の芝を除いたロングパイル人工芝充填部に対して多段階・多面積衝撃試験を行い応答特性を測定した。そして、すでに報告されている指数関数型非線形 Voigt モデルのパラメータ同定を行い、ロングパイル人工芝充填部の緩衝特性の検討を行った。

- (1) 充填剤内に芝がないサンプルに対して実験を行ったが、Test foot が充填剤に埋まりこみ重錘を高い位置から落下させることが出来ず十分に測定ができなかった。また、測定できた範囲においてもロングパイル人工芝に対して実験を行った場合と衝撃波形が大きく異なった。
- (2) 本研究で用いた表出部に芝がないサンプルに対して実験を行った結果、比較的安定したデータが得られた。さらに、すでに報告されている指数関数型非線形 Voigt モデルのパラメータ同定においても先行研究の結果と同等精度が得られたため本研究のサンプルに対しても指数関数型非線形 Voigt モデルの適応が可能であると考えられる。

文 献

- (1) Kevin R.Ford, Neil A.Manson, Blake,J.Evans, Gregory D.Myer, Richelle C.Gwin, Robert S.Heibit Jr., Timothy E.Hewett, “Comparison of in-shoe foot loading patterns on natural grass and synthetic turf”, *Journal of Science and Medicine in Sport*(2006)9, 2006, pp.433-440.
- (2) 財団法人 日本サッカー協会, “JFA ロングパイル人工芝ピッチ”, 公認に関するガイドブック, 第5版, (2010), pp.1-33.
- (3) 湯川治敏, 藤本雄太, 河村庄造, 小林一敏 “多段階強度・面積衝撃試験を用いたロングパイル人工芝の非線形粘弾性モデルのパラメータ同定”, 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス講演論文集, 2012, pp225-229