

サッカーボールとゴールキーパーグローブの衝突圧力解析と 表面摩擦特性の評価

佐々木 亮太^{*1}, 洪 性賛^{*2}, 坂本 慶子^{*1}, 浅井 武^{*2}

Experimental analysis of oblique soccer ball bounce on the goalkeeper gloves' surface

Ryota SASAKI^{*1}, Sungchan HONG, Keiko SAKAMOTO and Takeshi ASAI

^{*1} Doctoral Program of Tsukuba Univ., Inst. of Health and Sports Sciences
Tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8574 Japan.

Some previous studies have reported the consistency of the model calculations of the impact force, angle of reflection, coefficient of restitution, and the ball speed and angular velocity after impact. The others have reported the theoretical analyses of the effect of friction for impact if the ball and the flat surface have friction, or not. But only few data from the previous research have reported the experimental measurement of the impact of the soccer ball, which is pressurized spherical elastic shell, against the flat surface which has friction. This study is primarily intended to find out the property of the characteristics of the friction force which is formed by the collision of the soccer ball against the materials used for the goalkeeper gloves, changing the impact speed from 10 to 30 m/s. The soccer balls shot out by the 3 rotors machine keep the angular velocity 0 and come into collision on the angle with the rectangular-shaped latex formed material used for the goalkeeper gloves on the force plate. The impact force is measured vertically and horizontally from the force plate. Getting the averaged impact force curves, we discussed about the feature of the friction force between the soccer ball and the latex formed material. In addition, we measured the surface texture of the latex formed material by using the laser displacement meter, and discussed the relationship between the friction force and the surface texture.

Key Words: Soccer ball, Impact, Friction

1. 序論

球殻と剛体平面の摩擦を伴う衝突の理論解析やシミュレーションを用いたモデル計算の研究は数多く報告されているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, 実験的にボールを平面に衝突させ, その衝突圧力波形の特性や表面の摩擦特性を評価・分析している研究は, まだまだ数少ないのが現状である. テニスやゴルフの分野では, 衝突圧力波形やボールの変形量の測定, 有限要素法を用いたシミュレーション衝突解析など, 衝突と摩擦に関する研究が比較的盛んに報告されているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, 特にサッカーの分野では, このような研究はほとんど報告されていない. また, 衝突する素材の表面構造を定量的に測定している研究も少ない.

本研究では, サッカーボールをフォースプレートに斜めに衝突させ, 衝突圧力の垂直成分と水平成分の特性を得ることを目的とした. フォースプレート上には, サッカーのゴールキーパーグローブの表面に使用されている, ラテックスフォーム素材を固定し, 異なる素材での衝突圧力の変化を評価した. また, レーザー変位計を用いてラテックスフォーム素材の表面形状を観察し, 摩擦特性に大きく影響を与える表面構造特性を明らかにすることを目的とした.

^{*1} 学生員, 筑波大学 人間総合科学研究科

^{*2} 正員, 筑波大学 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: s1130503@u.tsukuba.ac.jp

2. 実験方法

図 1 に実験装置の配置の簡略図を示す。サッカーボールを射出する装置には、3 ローターマシン (SUNAGA KAIHATSU, SSK-03) を用いた。衝突圧力を計測するフォースプレートには、フォースプレート (KISTLER, 9287CA) を用いた。衝突現象の撮影には、高速度カメラ (Photron, FASTCAM SA2) を用いた。

図 2 に実験で使用した 2 種類のサッカーボールの写真を示す。(a)は Tango12(adidas)であり、UEFA EURO 2012 の公式試合球として採用されたボールである。(b)は Vantaggio(molten, VG5000A)であり、全国社会人サッカー連盟や全日本大学女子サッカー連盟などの公式試合球として採用されているボールである。両方のボールともに、32 枚のパネルから構成されており、パネル間はサーマルボンディング (熱接合) 技術によって接合されている。

図 3 に実験で使用した 2 種類のラテックスフォーム素材を示す。これらの素材はゴールキーパーグローブの表面に使用されており、(a)はソフトタイプ、(b)はエンボスタイプのラテックスフォーム素材である。両方の素材ともに、molten 社から原反を提供して頂いた。ボールの内圧は 900 hPa に設定した。

ローターマシンによって射出されたサッカーボールは、無回転でフォースプレート上に固定されたラテックスフォーム素材に衝突する。ラテックスフォーム素材は接着剤 (コニシ, ウルトラ多用途 SU) を用いて木板に接着し、木板はフォースプレートに 4 点でビス止めした。高速カメラを用いて撮影した映像から、ボールの入射・反射速度、衝突の入射・反射角、および衝突後のボールの回転の角速度を、ビデオ動作解析システム (DKH, Frame-Dias4) を用いて分析・算出した。

ラテックスフォーム素材の表面構造観察には、レーザー変位計 (KEYENCE, LJ-V7060) を使用した。

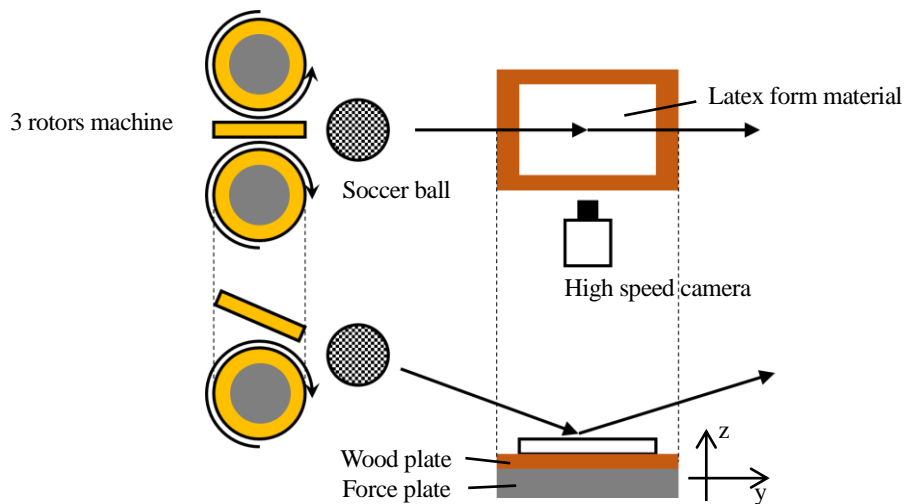


Figure1 Simplified schematic of experiment environment



Figure2 (a) Tango12 (b) Vantaggio (VG5000A)

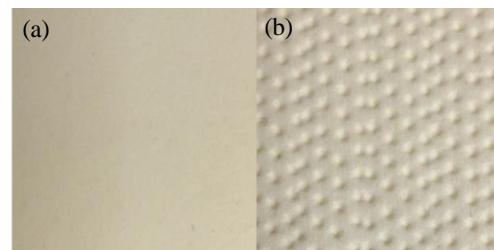


Figure3 Latex form material (a) Soft (b) Emboss

3. 結果と考察

3・1 衝突圧力波形

図4にボールとラテックスフォーム素材の衝突圧力波形を示す。(a)はTango12とソフトタイプ(以下, 素材S), (b)はTango12とエンボスタイプ(以下, 素材E), (c)はVantaggioと素材S, (d)はVantaggioと素材Eの衝突圧力波形をそれぞれ示している. 図1に示すように, フォースプレートに対して鉛直上向きをz軸の正方向, フォースプレートに水平で, ボールの進行方向をy軸の正方向と定義し, 衝突圧力のz軸方向の成分を F_z (図4左), y軸方向の成分を F_y (図4右)とした. 衝突速度は10(赤), 15(黄), 20(緑), 25(青), 30(紫) m/sであり, 各速度で10回測定を行い, それぞれの速度での平均曲線を算出した.

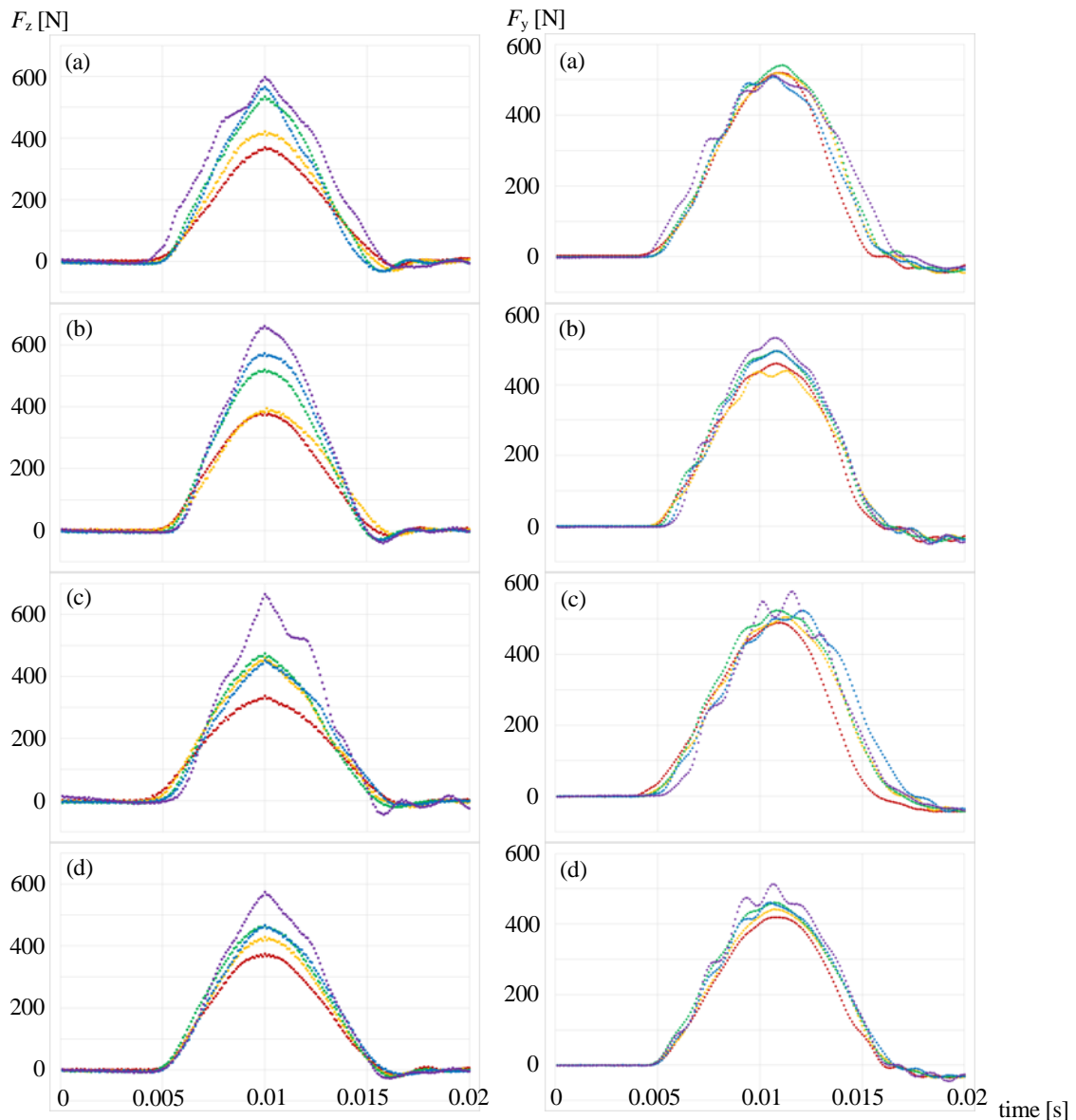


Figure4 The average waveform of F_z (left) and F_y (right)
 (a)Tango12 on Soft (b)Tango12 on Emboss (c)Vantaggio on Soft (d)Vantaggio on Emboss
 The initial ball speed is 10(red), 15(yellow), 20(green), 25(blue), 30(purple) m/s.

図4より, 全ての速度において, ボールの接触時間は約0.01秒であり, この値は先行研究と近い値となっている⁽¹¹⁾. F_z はボールと素材の反発係数に依存し, ボールと素材の表面の摩擦係数には依存しないことが知られている. 一方, F_y はボールと素材の表面摩擦力が大きく寄与することがわかっており, F_y が大きいほどボールと素材の表面摩擦係数が高いと考えられる. また, F_y の力積が大きいほど, ボールを回転させる角力積が大きくなり, 衝突後のボールの角速度は大きくなると思われる.

次節では F_z , F_y の最大値（ピーク値）に注目し、素材の違いによるピーク値の変化や、それぞれの速度依存性について考察する。

3・2 ピーク値の速度依存性

図5に F_z (左), F_y (右) の最大値の速度依存性を示す。青実線が Tango12 と素材 S, 青破線が Tango12 と素材 E, 赤実線が Vantaggio と素材 S, 赤破線が Vantaggio と素材 E の組み合わせである。

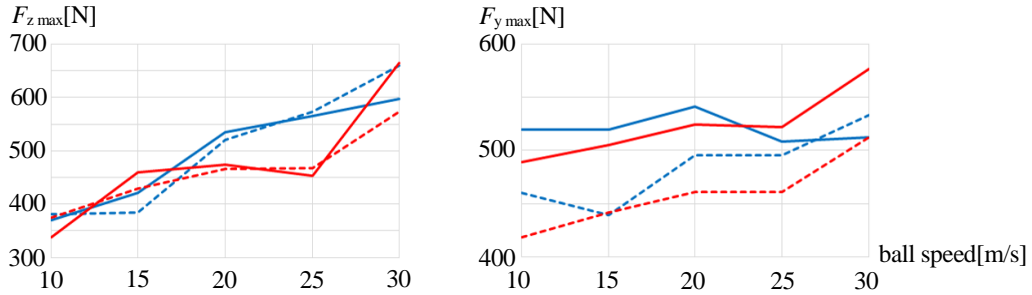


Figure5 The ball speed dependency of the peak value of F_z (left) and F_y (right)
Tango12 on Soft(blue line), Tango12 on Emboss(blue dash line)
Vantaggio on Soft(red line), Vantaggio on Emboss(red dash line)

F_z と F_y の最大値の速度依存性を比較すると、 F_z は F_y よりも速度依存性が高く、 F_y は F_z よりも素材の違いによる変化が大きいと考えられる。特に Vantaggio に対しては、全ての速度において素材 S の方が、素材 E よりも F_y の最大値が大きいという結果となった。また、Tango12 に対する F_y の最大値が、ボールの速度が 25 m/s 以下では素材 S の方が大きく、30 m/s 以上では素材 E の方が大きいという結果となった。

これらの現象は、ボールの素材の表面構造が大きく関与していると考えられるが、現段階ではどのような要因かを特定するには至っていない。ボールの速度が大きくなるに従って、最大静止摩擦力以上の力が y 軸方向に作用し、衝突中にボールが滑り、摩擦力が低下した可能性も否定できない。その場合、Tango12 に対する最大静止摩擦力が、素材 S よりも素材 E の方が大きいと考えられる。次節ではレーザー変位計で測定した各素材の表面の断面構造を示し、 F_y の最大値の速度依存性との関連性を考察する。

3・4 ラテックスフォーム素材の表面構造

図6にレーザー変位計で測定した、素材 S (上) と素材 E (下) の表面の断面図を示す。

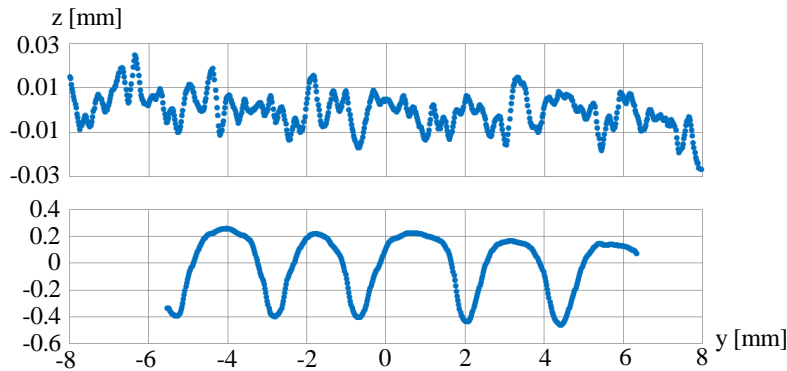


Figure6 The cross-section diagram of the surface of Soft(above) and Emboss(below) typed latex form material

衝突圧力と同様に、面直方向を z 軸、面内並行方向を y 軸と定義した。素材 E の測定の際には、エンボス加工の穴の大きさを測定するために、穴を横切る断面を測定した。図6の2つのグラフの y 軸のスケールは等しい

が、z軸に関しては1桁ほど異なっていることに注意されたい。つまり、表面の凹凸の深さは、素材Eの方が素材Sよりも約10倍深いことがわかる。この測定結果より、エンボス加工によって素材Eの表面に形成された穴の直径は約1mm、深さは約0.6mm程度であり、この穴が間隔約2mmで均一に分布していると推測できる。このような表面構造を仮定し、素材Eの穴の部分は衝突時にボールと接触しないと考えると、素材Eの接触面積は素材Sと比べて約40%減少することになる。一般的に、接触面積が減少すると、物体に作用する摩擦力は減少する。図5で示した素材による F_y の最大値の変化は高々10%程度であるが、この接触面積の差が要因となっている可能性が考えられる。

4. 結論

本研究では、サッカーボールをゴールキーパーグローブに使用されているラテックスフォーム素材に斜めに衝突させ、衝突圧力の波形を、フォースプレートを用いて観察した。実験に使用した2種類のボールはTango12とVantaggioであり、特にVantaggioにおいては、ソフトタイプのラテックスフォーム素材に衝突した場合の方が、エンボスタイプのラテックスフォーム素材に衝突した場合より摩擦力の最大値が大きくなった。また、ボールやラテックスフォーム素材の種類に関係なく、ボールの速度が大きくなるにしたがって、ボールと素材に作用する摩擦力の最大値が増加する傾向が得られた。さらに、レーザー変位計を用いてラテックスフォーム素材の表面形状を観察し、接触面積が小さくなると、摩擦力の最大値が減少する可能性が示された。

今後はボールとラテックスフォーム素材の種類を増やし、衝突速度の増加や衝突角度を変化させる実験を行い、様々な条件の衝突を分析し、サッカーボールの衝突現象の研究をより深めていきたい。

5. 謝辞

本研究で使用したサッカーボール Vantaggio と、ゴールキーパーグローブに使用されているラテックスフォーム素材を、株式会社モルテン様に提供して頂いたこと、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 矢ヶ崎一幸, 遠藤浩敏, “衝突と摩擦を伴う剛体の運動”, 日本機会学会機械力学・計測制御講演論文集 (1998), No. 98-8
- (2) David E. Stewart, “Rigid-Body Dynamics with Friction and Impact”, *SIAM REVIEW* (2000), Vol. 43, No. 1, pp. 3-39.
- (3) M. Hubbard and W. J. Stronge, “Bounce of hollow balls on flat surfaces”, *Sports Engineering* (2001) **4**, 49-61.
- (4) R. Cross, “Dynamic properties of tennis balls”, *Sports Engineering* (1999) **2**, 23-33.
- (5) R. Cross, “Effect of friction between ball and strings”, *Sports Engineering* (2000) **3**, 85-97.
- (6) 上野久儀, 松井良雄, 中野泰明, “テニスボールの剛体衝突時における衝突力波形と回転特性について”, 日本機械学会講演論文集 (2002), No. 02-9.
- (7) S. J. Haake, M. J. Carre and S. R. Goodwill, “The dynamic impact characteristics of tennis balls with tennis rackets”, *Journal of Sports Sciences* (2003), **21**, 839-850.
- (8) S. R. Goodwill and S. J. Haake, “Ball spin generation for oblique impacts with a tennis racket”, *Experimental Mechanics* (2004), Vol. 44, No. 2, 195-206.
- (9) S. R. Goodwill, R. Kirk and S. J. Haake, “Experimental and finite element analysis of a tennis ball impact on a rigid surface”, *Sports Engineering* (2005), **8**, 145-158.
- (10) K. Arakawa, T. Mada, H. Komatsu, T. Shimizu, M. Satou, K. Takehara and G. Etoh, “Dynamic contact behavior of a golf ball during oblique impact: Effect of friction between the ball and target”, *Experimental Mechanics* (2007), **47**, 277-282.
- (11) Ali Rezaei, Rudy Verhelst, Wim Van Paepegem and Joris Degrieck, “Finite element modelling and experimental study of oblique soccer ball bounce”, *Journal of Sports Sciences* (2011), **29**, 1201-1213.