

## パネル向きがサッカーボールの抗力に与える影響

洪 性賛<sup>\*1</sup>, 坂本 慶子<sup>\*2</sup>, 佐々木 亮太<sup>\*2</sup>, 小泉 朝香<sup>\*2</sup>, 中山 雅雄<sup>\*1</sup>, 浅井 武<sup>\*1</sup>

### Effects of panel orientation for drag force on soccer ball

Sungchan HONG<sup>\*1</sup> Keiko SAKAMOTO, Ryota SASAKI, Asaka KOIZUMI,

Masao NAKAMAYA and Takeshi ASAI

<sup>\*1</sup> University of Tsukuba.

Tennoudai 1-1-1, Tsukuba, 305-8574 Japan

Traditionally, the soccer balls used in soccer tournaments had 32 pentagonal and hexagonal panels. Also, 14- and 8-panel balls have been used. Recently, new 32-panel ball (Cafusa, Adidas) with unverified aerodynamic characteristics are using. There is a need to understand the aerodynamic characteristics of a new 32-panel ball that used a variety football league. The purpose of this study was to analyze the basic aerodynamic characteristics of the Cafusa ball (32-panel) by using a wind tunnel. Also, we measured the orientations (Face A, B, C) of the aerodynamic forces for Cafusa ball. The critical Reynolds number of the Face A, Face B, and Face C was  $\sim 2.6 \times 10^5$  (drag coefficient,  $C_d \approx 0.12$ ),  $\sim 2.4 \times 10^5$  ( $C_d \approx 0.16$ ), and  $\sim 2.4 \times 10^5$  ( $C_d \approx 0.15$ ), respectively. The flight trajectory simulation suggested that Face C has less air resistance in the high-speed region than the other Faces. It is considered that the critical Reynolds number of a soccer ball depends on the panel orientations.

**Key Words** : Cafusa, Drag, Panel, Soccer ball, Trajectory.

### 1. 結 言

一般に、サッカーボールは4年1回行われるFIFAワールドカップを中心に、その公式球のパネルの形やデザインなどが変えてきた。従来のサッカーボールは、典型的な形である六角形パネルと五角形パネルで構成された32枚のパネルであったが、2006年行われたドイツワールドカップの公式球 (Teamgeist, 14-panels, Adidas) から、パネルの形状が大きく変化した。チームガイストというボールのパネル形式は、従来の32枚 (六角形と五角形) ではなく、14枚という画期的な形のため多くの話題になった。その後、2010年の南アフリカ大会では8枚のパネルで制作されたジャブラニ (Jabulani, 8-panels, Adidas) が登場した。これまでの先行研究では、従来の32枚ボールを含めて14枚ボールと8枚ボールに関する様々な流体力学的研究が報告されてきた<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。さらに、2013年6月にブラジルで開催されたFIFAコンフェデレーションズカップ2013では、新球のカプサ (Cafusa, 32-panels, Adidas) が公式球として使用され、現在も多くのプロサッカーリーグを始め国際試合での試合球として使われている。このカプサボールは、従来の32枚で構成されたボールとそのパネル数は同一である。しかし、従来のボールのパネル配置が単純な六角形と五角形の配列であることに比べて、カプサボールのパネルは、そのパネルの向き (フェイス, Face) によってその形が異なり、大きく分けて3つのパネル向き (Face) に分類ができる。しかし、カプサボールに関する流体力学的研究やそのボールのパネル向きによるボールに加える空力特性などに関する研

<sup>\*1</sup> 正員, 筑波大学 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

<sup>\*2</sup> 学生員, 筑波大学大学院 コーチング学専攻

E-mail: sr7931@hotmail.com

究は少なく、その解明が求められている。そこで、本研究では、2013年 FIFA コンフェデレーションズカップの公式球であるカプサを用いて3つのパネル向き（Face）による抗力を中心に検討した。さらに、パネル向きによるボール飛翔距離を2Dシミュレーションで計測すると共にパネル向きが実際にボール弾道への影響をキックロボットで検討した。

## 2. 実験および解析方法

### 2.1 風洞実験

本実験には、筑波大内にある回流型低速低乱風洞（San Technologies Co., LTD）を使用した（図1）。最大風速は、55m/s、吹き出しサイズは1.5m×1.5m、風速分布は±0.5%以内、乱れ度は0.1%以下である。この風洞に32枚で構成されている新球サッカーボールのカプサ（Cafusa, Adidas-32panel）を取り付け、実験を行った。本実験では、同様のカプサボールに対してパネルの向き（Face）を3つに分け、各々のフェイス（Face A, B, C）によるボールの抗力を計測した（図2）。さらに、3つのフェイスに関して各々の向きを0°から360°まで位置を変えて、風速（ $U$ ）を7から35m/sまで計測した。パネル向きであるフェイス（Face）は図2のように設定し、サッカーボールに働く力は、スティング型6分力検出器（LMC-61256, Nissho Electric Works）により測定した。また、本実験では、計測した空気力から抗力係数（ $C_D$ ）を求めた（式（1））。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は空気の密度で、 $\rho=1.2\text{ kg/m}^3$ 、 $U$ は流速、 $A$ はサッカーボールの投影面積で、 $A=\pi\times 0.112=0.038\text{ m}^2$ とした。



Fig. 1 Set-up wind tunnel test

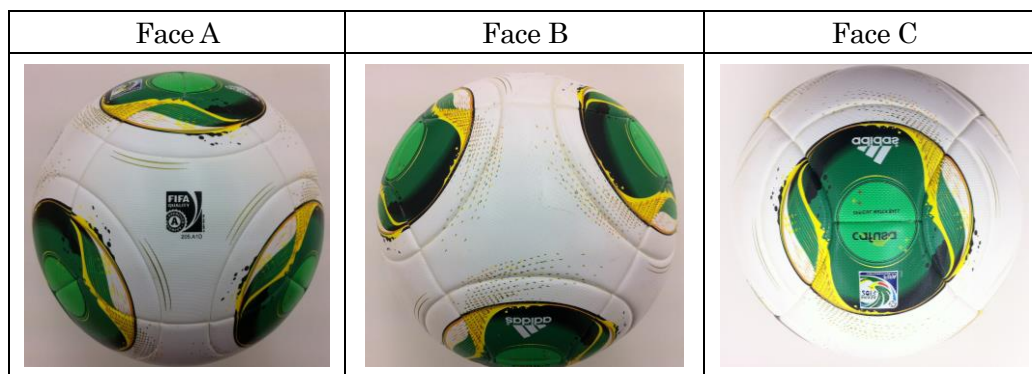


Fig. 2 Panel orientation toward the upwind

## 2・2 キックロボット実験

キックロボットの実験は筑波大の室内研究棟 (SPEC) で行った。キックロボットの前方 25 m にサッカーゴールをセットし、ゴール中央をめがけて、無回転のボールでキックさせた (図 3)。サッカーゴール正面 25 m の地点にボールを静止してキックロボットにプレースし、キックロボットの左側 50cm から準高速ビデオカメラ (300 fps) を設置し、各試技を撮影した (図 4)。

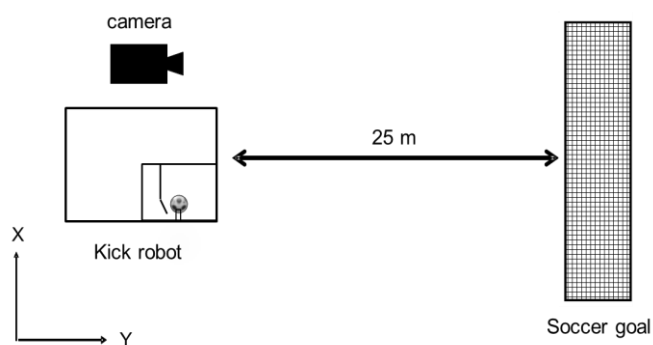


Fig. 3 A multi-purpose kick-robot used in this study. Fig. 4 Setup of the experiment using kick-robot.

また、キックロボットで打ち上げるボールの初期条件としては、初速度 30m/s のホールスピードでボールの回転数は無回転系 (1 回以内) で設定し、継続的に反復して撮影を実施した。各々のパネル向き (Face A, Face B, Face C) において各 20 回を実施した。実際に飛翔したボールがゴールネットに当たるボールを弾着ポイントとして分析した。

## 3. 結果及び考察

### 3・1 風洞実験による抗力係数

図 5 はカプサボールの各々のパネル向き (Face A, B, C) に対するボールの抗力の特性曲線を示したものである。大きな抗力変化を示すドラッグクライシス領域は Face C が最も低く、次に Face B, Face A の順であることを示す。また、Face A は  $Re = 1.5 \times 10^5$  から、Face B と Face C では  $Re = 1.3 \times 10^5$  から  $C_D$  値が 0.5 付近から 0.2 以下まで落ちている。さらに、超臨界の抗力係数は Face A では約 0.12, Face B は約 0.16, そして Face C は約 0.15 を示し、Face B が他のパネル向きに比べて相対的に高い値を示した。従って、カプサボールのパネル向き (フェイス) の変化がボールの抗力に影響を与えると考えられる。

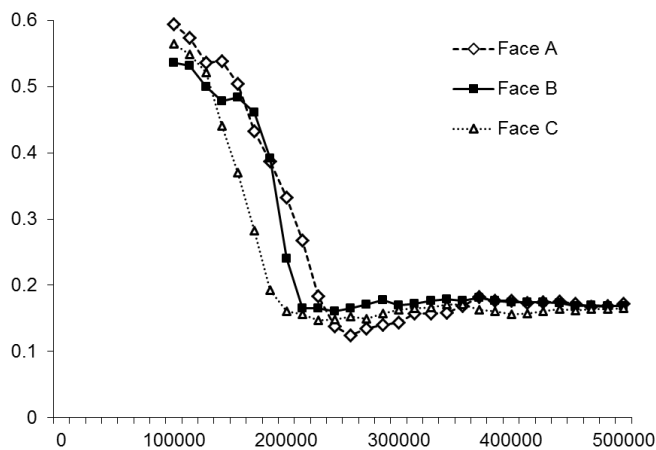


Fig. 5 Drag coefficient ( $C_D$ ) of the Cafusa ball (Face A, Face B, and Face C).

### 3・2 フェイス向きの変更による抗力の変化

図6は、各パネルフェイス (Face A, B, C) を  $90^\circ$  及び  $180^\circ$  向きを変えて固定し風速  $7\text{m/s}$  から  $35\text{m/s}$  までの抗力を検討したものである。超臨界の抗力係数では、パネルフェイスが  $h$  の時 (Face B の  $180^\circ$ ) が約  $0.18$  として最も高い値を示し、パネルフェイスの  $f$  (Face C の  $90^\circ$ ) が約  $0.13$  として最も低い値を示した。また、同じパネルフェイス (向き) でも向きの角度 (位置) によってボールに加える抗力が変わる傾向が見られた。

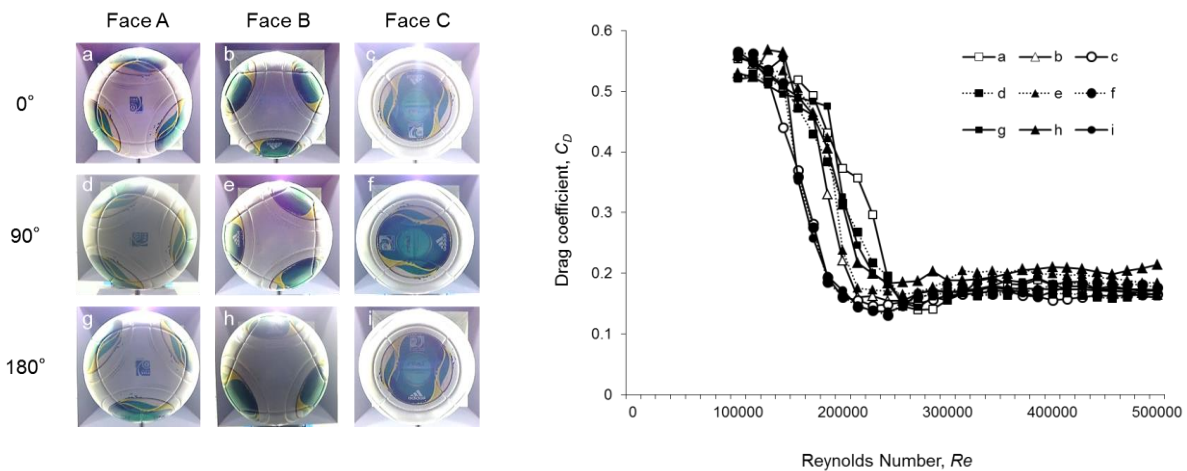


Fig. 6 Drag coefficient ( $C_D$ ) of the Cafusa ball (Face A(a, d, g), Face B(b, e, h), and Face C(c, f, i)).

さらに、パネルフェイス A の場合、パネルフェイスを  $90^\circ$  及び  $180^\circ$  変えることによって臨界領域での  $C_D$  値の差が見られる。Face A  $0^\circ$  では  $Re=1.7 \times 10^5$  から、 $90^\circ$  では  $Re=1.5 \times 10^5$  から、そして  $180^\circ$  では  $Re=1.8 \times 10^5$  から  $C_D$  値が  $0.5$  付近から  $0.2$  以下まで落ちている (図 7a)。また、パネルフェイス B では超臨界領域での  $C_D$  値がフェイスの向き (角度変化) によって変化することが分かる。Face B  $0^\circ$  の超臨界の抗力係数は約  $0.15$  を示し、 $90^\circ$  では約  $0.17$ 、そして  $180^\circ$  では約  $0.18$  を示している (図 7b)。しかし、パネルフェイス C では向き (角度の変化) による抗力差は見られなかった。これらの結果から、Face A はボールの中間スピード ( $11 < U < 19\text{m/s}$ ) で、Face B では早いスピード ( $20 < U < 35\text{m/s}$ ) において同一な顔 (Face) でも向きの角度を変えることによってボールに加える抗力が変化すると考えられる。

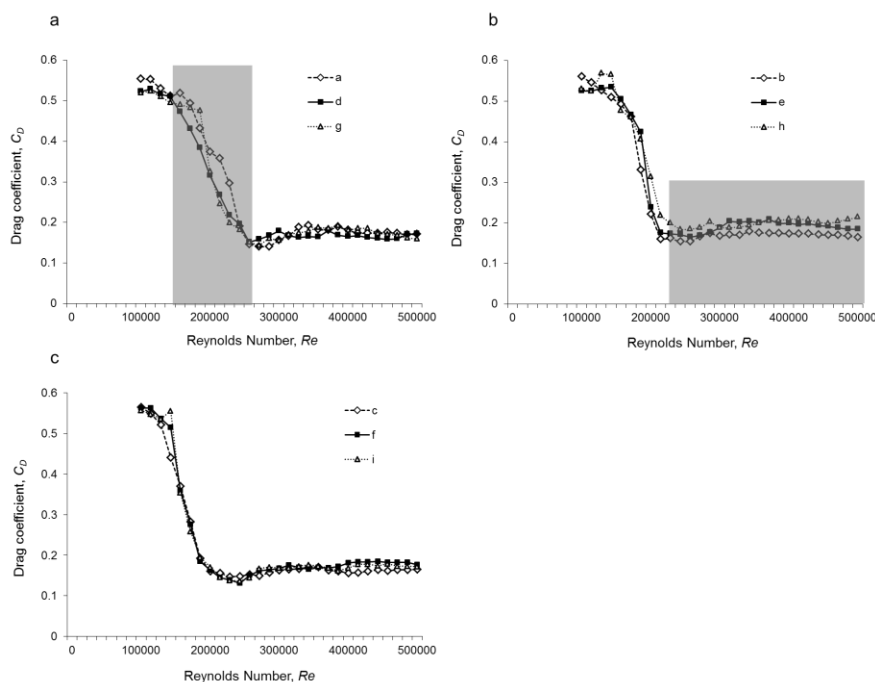


Fig. 7 Drag coefficient ( $C_D$ ) for each Face type (Face A(a), Face B(b), and Face C(c)).

また、パネルフェイス A の場合、 $0^\circ$  を基準として、パネルの向きを正面から時計方向（右方向）に各々  $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  で設定し（図 8a）、その時のボールに加えた抗力係数を示した（図 8c）。また、図 8d は、時計反対方向の  $-60^\circ$  ( $300^\circ$ )、 $-90^\circ$  ( $270^\circ$ )、 $-120^\circ$  ( $240^\circ$ ) として設定した時（図 8b）の抗力係数を示したものである。パネルフェイスの向きの方向を時計方向（右方向）に変えた時、3つのパネル向き（ $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ ）における抗力係数は、約 0.15 としてほぼ同様な値を示している（図 8c）。また、時計反対方向に変えた3つのパネル向き（ $240^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $300^\circ$ ）の抗力係数は、約 0.13 としてほぼ同一な値を示している（図 8d）。これは、パネル向きの左右への角度変化によってその抗力値が変わる可能性があると考えられる。しかし、この結果はボールを支える方法や非定常的な振動の影響の可能性があるので、この部分に対する解決方法は今後の課題である。

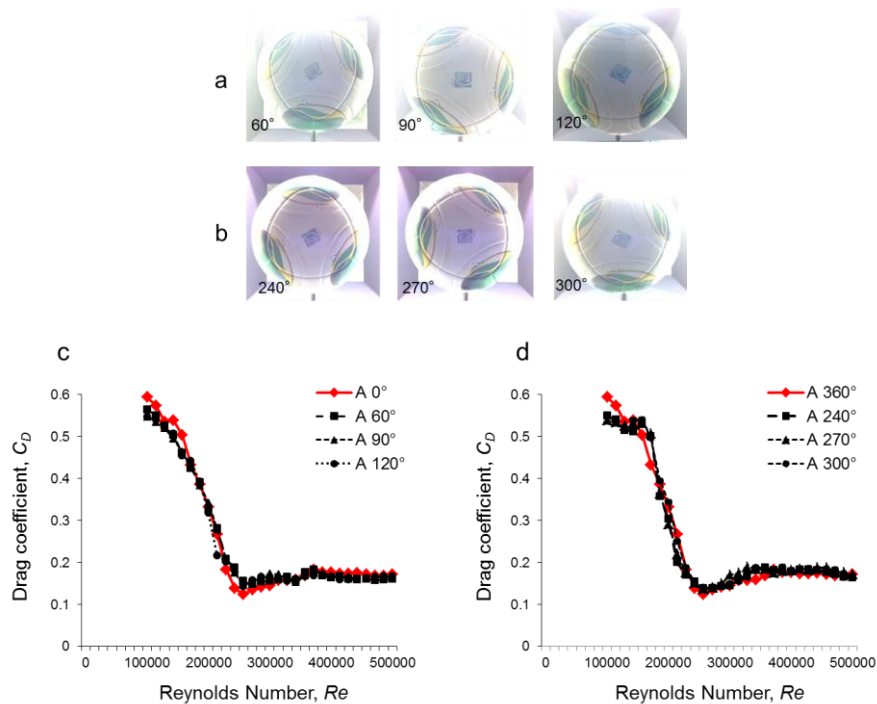


Fig. 8 Drag coefficient ( $C_D$ ) of the Cafusa ball (a, b( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ), b, c( $240^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $360^\circ$ )).

### 3・3 ボールの飛翔距離シミュレーション

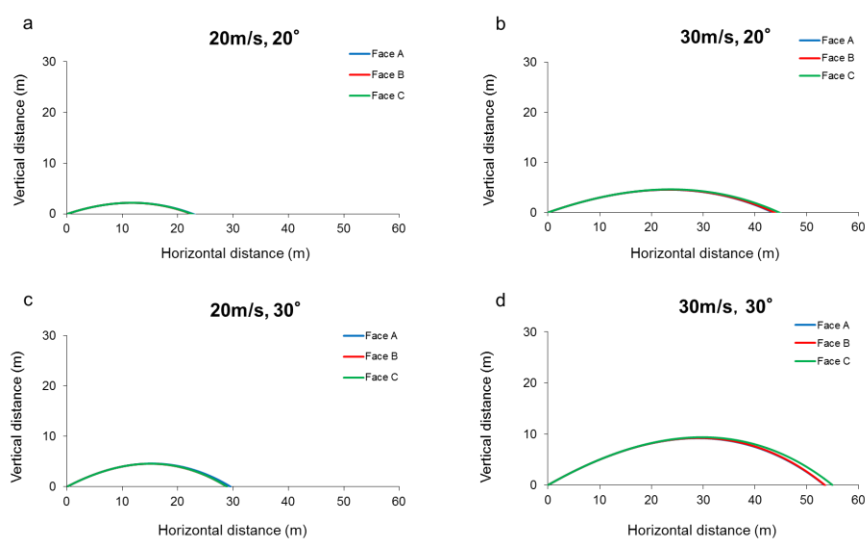


Fig. 9 Flight trajectory of the Cafusa (Face A, B, C) in a simple 2D flight simulation.

(a, c) Initial ball velocity: 20 m/s. (b, d) Initial ball velocity: 30 m/s.

(a, b) Ball launching angle in all cases:  $20^\circ$ . (c, d) Ball launching angle in all cases:  $30^\circ$ .

各々のパネルフェイスによる飛翔距離をボールの2D飛翔シミュレーションを用いて計測した(図9). 実際の試合でパスとしてよく使われるスピードとして20m/sを, 強烈なシュートのスピードとして30m/sを設定し, ボール飛び出す角度を20度と30度において各々のパネルフェイスによる飛翔距離を計測した. 初速度20m/s, 飛び出す角度20°のボール飛翔距離は, Face Aでは22.7m, Face Bでは22.4m, そしてFace Cでは22.5mとして示し, 大きな差は見られなかった(図9a). しかし, 同様の速度(20m/s)で, 飛び出す角度30°では, Face Aが29.5mの飛翔距離を示してFace Bの28.8mとFace Cの28.9mより約0.6m以上遠く飛翔した(図9c). また, 初速度30m/sでのボール飛翔距離は, 飛び出す角度20°の場合でFace Aが43.6m, Face Bが43.7mに比べ, Face Cは44.7mとして最も長い飛翔距離を示した. さらに, 飛び出す角度30°でもFace Cが54.9mとしてFace AとFace Bの53.9mより約1m長い飛翔距離を示している. これらの結果から, 中間スピードではFace Aが最も飛翔し, 早いスピードではFace Cの方が最も飛翔すると考えられる.

### 3・4 キックロボットによるボール弾着ポイント

図10は, 実際にキックロボットを用いてボールを打ち出し, 25m離れたゴールネットにボールが当たったポイント(弾着)を示したものです. 打ち出すボールの初速度は30m/sでボール回転数は1回以内で設定し各パネルフェイスを20回ずつ計測した. 図10に示したようにFace Aが最も高い所(x-y座標平均=1.8, 266.8)に弾着し, Face Bは最も低い所(x-y座標平均=19.0, 21.5)に弾着した. このFace AとFace Bの弾着ポイントの差は約200cm程度であった. また, Face Bの場合, ボールがゴールネットに到達した弾着ポイントの範囲(x座標における標準偏差は約66.6)が, Face A(約35.6)とFace C(約44.5)に比べて幅広く, 相対的に不規則な飛翔軌道を示している.

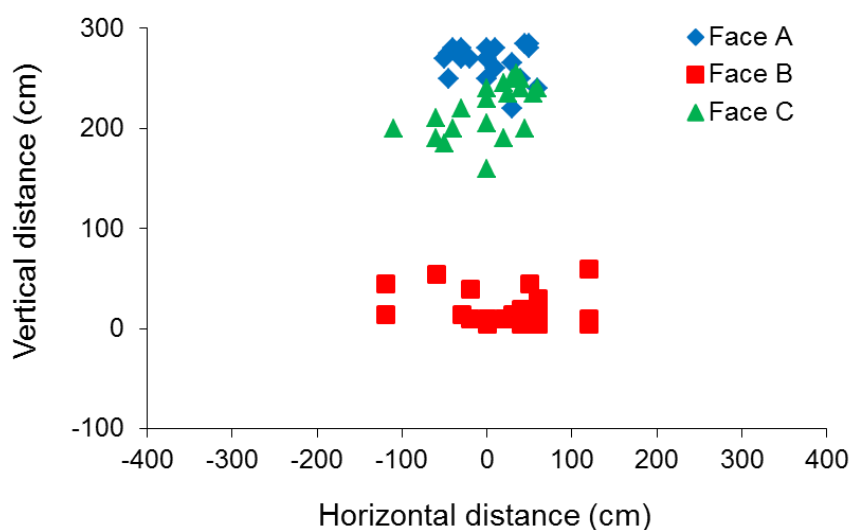


Fig. 10 Impact points for each Face type of the Cafusa

また, 図11は, 同一なFaceを各々180°変えてボールを打ち出した結果である. Face Bはフェイスの向きを180°変化すると, 実際のサッカーボールの飛翔軌道が右(x-y座標平均=19.0, 21.5)から左(x-y座標平均=-64.3, 40.3)へ移動していることが分かる(図11b). さらに, Face Aではフェイスの角度が180°変わることで, ボールが到達する弾着ポイントがy座標値の266.8から25.5へ大きく変化した(図11a). これらの結果から, 同一のフェイスでもボールを置く位置(角度)によってボールの飛翔軌道やその弾着ポイントが変わると考えられる.

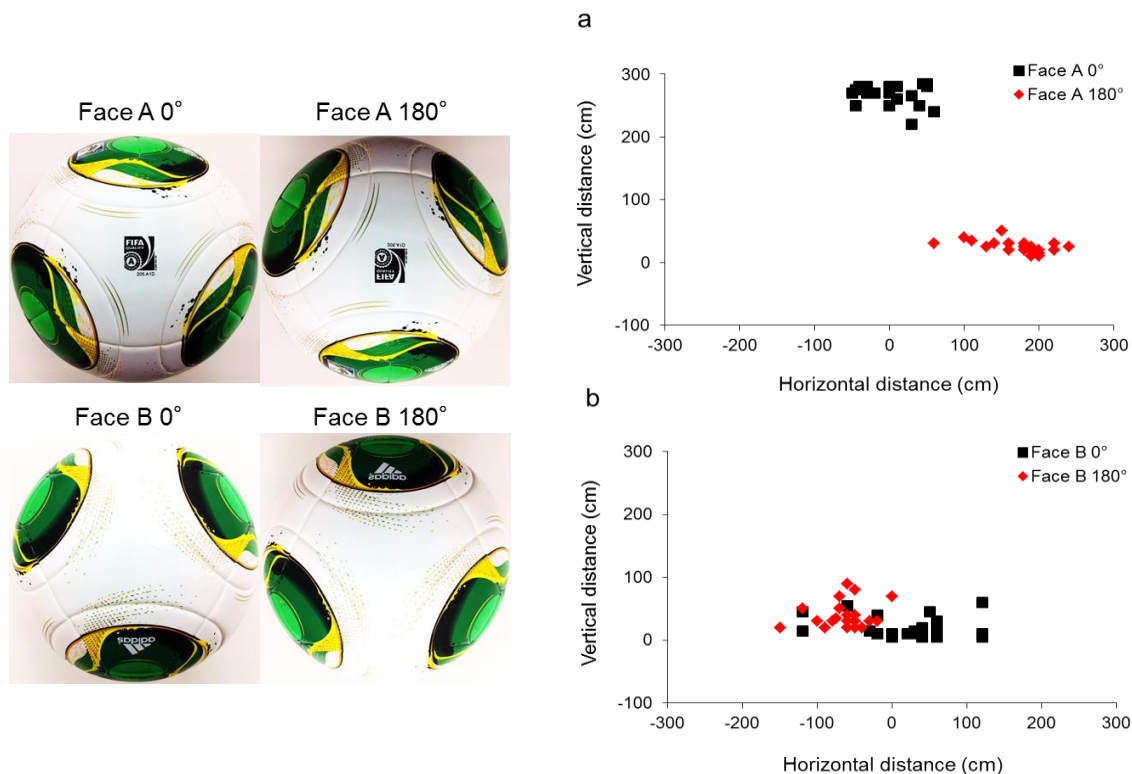


Fig. 11 Impact points for Face A type ball (a), and Face B type ball (b)

#### 4. 結 論

本研究では、新球のサッカーボール（カプサ）について、そのパネルフェイス（向き）と抗力の関係を検討した。さらに、パネル向きが実際のボール飛翔軌道に及ぼす影響を明らかにしようとした。結果を以下に要約する。

1. Face A は  $Re = 1.5 \times 10^5$  から、Face B と Face C では  $Re = 1.3 \times 10^5$  から  $C_D$  値が 0.5 付近から 0.2 以下まで落ちていた。さらに、超臨界の抗力係数は Face A では約 0.12, Face B は約 0.16, そして Face C は約 0.15 を示し、Face B が他のパネル向きに比べて相対的に高い値を示した。

2. Face A では、フェイスの向きを  $90^\circ$  及び  $180^\circ$  変えることによって臨界領域での抗力値が変わっており、 $0^\circ$  では  $Re = 1.7 \times 10^5$  から、 $90^\circ$  では  $Re = 1.5 \times 10^5$  から、そして  $180^\circ$  では  $Re = 1.8 \times 10^5$  から  $C_D$  値が 0.5 付近から 0.2 以下まで落ちていた。また、Face B では超臨界領域での  $C_D$  値が向き（角度変化）によって変化があり、 $0^\circ$  では約 0.15,  $90^\circ$  では約 0.17, そして  $180^\circ$  では約 0.18 に変化した。

3. Face A では、パネルフェイスの向きの方向を時計方向（右方向）に変えた時 3 つのパネル向き（ $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ）における  $C_D$  は約 0.15, 時計反対方向に変えた 3 つのパネル向き（ $240^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$ ）の  $C_D$  は約 0.13 を示し、左右角度変化によって  $C_D$  に影響を及ぼすと考えられる。

4. ボールの飛翔シミュレーションの結果、初速度 20m/s の中間スピード区間では、Face A が 29.5m, Face B が 28.8m, Face C が 28.9m の結果を示し、Face A がより遠く飛翔する傾向があった。また、初速度 30m/s では、Face C が 54.9m として Face A と Face B の 53.9m より約 1m 長い飛翔距離を示していた。これらの結果から、中間スピードでは Face A が、早いスピードでは Face C が最も飛翔することを考えられる。

5. キックロボットを用いた実際のサッカーボールの飛翔軌道（弾着ポイント）の結果では、Face A が最も高い所に弾着し、Face B は最も低い所に弾着して、その差が約 2m くらいであった。また、Face C の弾着ポイントは、他の Face に比べて幅広く、相対的に不規則な飛翔軌道を示していた。

## 文 献

- (1) Alam, F., Chowdhury, H., Stemmer, M., Wang, Z., and Yang, J., “Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics”, *Procedia Engineering*, 34 (2012), pp. 146-151.
- (2) Asai, T., Ito, S., Seo, K., and Koike, S., “Characteristics of modern soccer balls”, *Procedia Engineering*, 34 (2012), pp. 122-127.
- (3) Asai, T., and Seo, K., “Aerodynamic drag of modern soccer balls”, *SpringerPlus*, 2 (2013), 171.
- (4) Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O., and Sakashita, R., “Fundamental aerodynamics of the soccer ball”, *Sports Engineering* 10 (2007), 101–110.