

表面形状を考慮した低抵抗スポーツ用具の開発

筑波大学 洪 性 賛

Development for Low Resistance Sport-Goods Considering Surface Form

by

Sungchan Hong

*Faculty of Health and Sport Sciences,
University of Tsukuba*

ABSTRACT

The pattern of the official ball used in the 2006 FIFA World Cup is considerably different from that of a conventional soccer ball (having 32 pentagonal and hexagonal panels) . Depending on the number of different panels and their orientation, the aerodynamic force experienced by a ball is believed to change, which in turn changes the ball trajectory. However, not much is known about the impact of the surface forms of a ball on its aerodynamics. Therefore, in the present study, 5 different types of soccer balls were produced and their aerodynamic properties were studied by wind tunnel experiments. The results confirmed that the aerodynamic force acting on the ball varied considerably depending on the surface form of the balls. Thus, the fact that the aerodynamic force acting on the ball varies depending on the surface form of the soccer ball suggests that surface roughness is also one of the important factors that determine the aerodynamic characteristics of the ball in addition to the shape and number of panels.

要 旨

最近のサッカーワールドカップの公式球は、ボール表面を構成するパネルの数やその形などの意匠が大きく変化しており、五角形と六角形の32枚のパネルで構成された従来のサッカーボールとその模様が大きく変わった。また、異なるパネルの数やその向きによってボールに加える空気が変わり飛翔軌道に大きな影響を与えると報告されている。しかし、サッカーボールの表面形状は、様々な形のボールパネルや縫い目が複雑に組み合わされており、それらのボール表面形状が、サッカーボールの空力に与える影響は、ほとんど不明である。そこで本研究では、異なる表面のデザイン（突起の意匠）で構成された5種類のサッカーボールを製作し、その空力特性を風洞実験で検討を行った。その結果、サッカーボールの表面にある突起の模様によってボールに働く空力特性が大きく変わる事が分かった。本研究により、最新サッカーボールの空力特性の究明だけでなく、今後開発されるサッカーボールの飛翔軌道がある程度予測可能になったと考えられる。

1. 緒 言

最近のサッカーボールでは、ボール表面の形やデザインなどに大きな変化があり、従来のサッカーボールとその模様が大きく違う。特に、近年のサッカーボールはFIFAワールドカップ大会を中心に、この公式球のパネルの形やデザインなどが大きく変わってきた。2006年行われたドイツワールドカップの公式球であるTeamgeistボールはパネル数が14枚で構成されており、従来のサッカーボールの典型的な形である六角形パネルと五角形パネルの32枚のパネルボールから大きく変化した。また、この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
 デサントスポーツ科学 Vol.40

くの話題になった。その後、2010年の南アフリカワールドカップ大会では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。さらに、2013年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た。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、そのパネルの向きによってその形が異なり、従来ボールのパネル配置とは全く異なっていた。また、2014年では、6枚のパネルで構成されたサッカーボールがワールドカップの公式球として使用された。この6枚のサッカーボール（Brazuca, 6-panels, Adidas）はその軌道が他の公式球に比べ安定しているという報告があり^{1,2)}、これまでの先行研究では、従来の32枚ボールを含めて14枚と8枚、そして6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¹⁻⁹⁾。そして2015年FIFA女子ワールドカップでもブラズーカと同じパネルの形のサッカーボール（Conext15, 6-panels, Adidas）が公式球で使用されるなど、現在も数多くのプロリーグをはじめ国際試合での試合球として使われている。さらに、2016年EUROカップでは、6枚で構成されたブラズーカと同様なパネル形からその表面の形状が少し変わったボージュ（BEAUJEU, 6-panels, Adidas）が公式球として登場した。このボールは2014年ワールドカップでのブラズーカと同様なパネル数と形であるが、ボール表面の模様には、小さな四角形の突起が凸凹で均等に構成されていることで、2014年ワールドカップのブラズーカが持っている特徴（波のように広がっている四角形の突起様子）とは形が変わっている。また、昨年の2018年ロシアワールドカップでは、2014年と同様に6枚の公式球

(Telstar18, 6-panels, Adidas)が登場した。このボールは2016年EUROカップの公式球(BEAU JEU, 6-panels, Adidas)と同じ表面突起で構成されているが、パネルの形が大きく変化してきた。このような変化は、これまでサッカーボールにおけるパネル数の変化からボール表面の形状(Surface roughness / texture)の変化への大きな進化になったと考えられる。しかし、このようなサッカーボール表面の突起意匠がボールの空力特性や飛翔軌道にどのように作用するかはほとんど解明されていない。

また、スポーツボールにおける空力の大きな特徴として、ボールが飛翔する際、ボール周りの境界層が、層流から乱流に遷移すると、空気抵抗が急激に減少することが知られている¹⁰⁾。これまで、サッカーボールの空力特性に関する研究において、臨界レイノルズ数(Critical Reynolds Number)は、しばしば報告されているが¹¹⁻¹³⁾、近年、新たに様々なパネル形状や表面デザインのサッカーボールが公式試合で使用されてきており^{2, 14)}、それらの空力特性や臨界レイノルズ数を明らかにすることが求められている。しかも、臨界レイノルズ数は、ボールスピードや飛翔軌跡に直接関係する空力的指標であり、近年のサッカー

ボールの臨界レイノルズ数を明らかにすることは、スポーツ科学やテクノロジーにおいても競技現場においても非常に重要であると考えられる。一方、臨界レイノルズ数は、球表面の凸凹の影響を受けることが、平滑球に関する研究において報告されている¹⁵⁾。また、サッカーボールの縫い目の形(縫い目の深さ・幅・長さなど)がボールの飛翔軌道へ及ぼす影響についても報告されている^{16, 17)}。しかし、サッカーボールの表面形状は、様々な形のボールパネルや縫い目が複雑に組み合わさっており、最近ではボール表面のディンプルのような小さな突起などが変わってきた。それらのボール表面形状がサッカーボールの空力に与える影響はほとんど不明である。

2. 実験および解析方法

そこで本研究では、サッカーボールの表面形状の特性を詳細に検討するために、同じ32枚のパネルで製作された5種類のサッカーボールの空力特性について検討を行った(図1)。各々サッカーボールの表面には、小さな突起の形を三角形、四角形または、六角形などに投入し、サッカーボールの異なる表面突起から空力への影響について比較検討した。従って、本研究では、サッカーボー

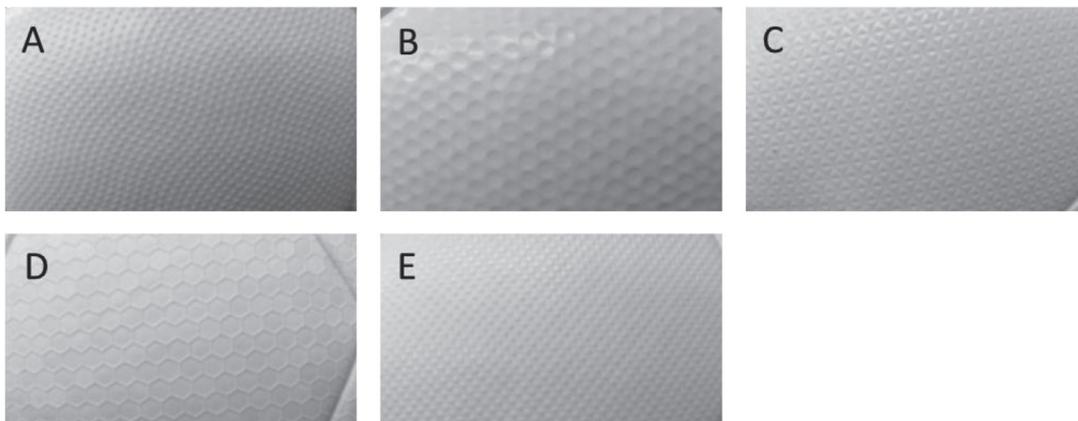


図1 本実験で用いた表面の形状が異なるサッカーボール(全て32枚のサッカーボールである)

ルの表面の形状（突起意匠）がサッカーボールの空力特性に及ぼす影響について風洞実験を用いた空力特性を検討した。風洞実験の結果によると、サッカーボールの表面の意匠によって空気から与える力が変化すると判断された。特に、先行研究で最も重要な要因であったパネルの数や形より、パネル表面形状が空力特性により大きな影響を与える事が分かった。

2. 1 風洞実験

本実験には、筑波大学内にある回流型低速低乱風洞（San Technologies Co., LTD）を使用した（図2）。最大風速は、55m/s、吹き出しサイズは

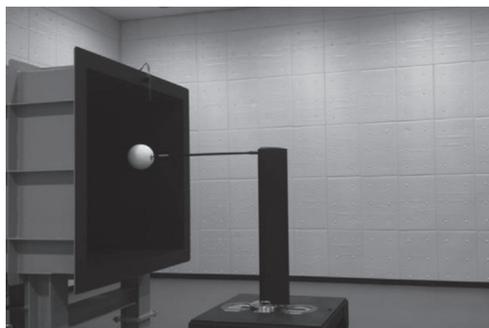


図2 風洞実験の様子

1.5m×1.5m、風速分布は±0.5%以内、乱れ度は0.1%以下であり、計測したサッカーボールのプロケージは吹き出しサイズに対して5%以内である。この風洞を用いて多様な表面の形で製作したサッカーボール5種類を取り付け、実験を行った。今回計測した5種類のサッカーボールは全て32枚の五角形と六角形のパネルで構成された一般的なサッカーボールである。Aタイプのサッカーボールは、パネル表面の形が小さな四角形の突起が波のように出ている形で構成されたサッカーボールであり、Bタイプのサッカーボールでは、ディンプルのサイズが異なる2つのタイプのディンプルで構成されたサッカーボールである。また、Cタイプのサッカーボールは、表面に小さ

な三角形の突起が連続で構成されており、Dタイプのサッカーボールは、六角形のHoney Hexagonのような形で構成されたサッカーボールである。さらに、Eタイプのサッカーボールは、小さな四角形の突起が均等に構成されている。

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、本実験で計測した空気力は、式（1）、（2）、（3）に示すように抗力係数（Cd）、揚力係数（Cl）、横力係数（Cs）として変換した。

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

$$C_l = \frac{2L}{\rho U^2 A} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{2S}{\rho U^2 A} \quad (3)$$

ここで、 ρ 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、 $A=\pi \times 0.11^2=0.038\text{m}^2$ とした。

3. 結果

3. 1 サッカーボール表面形状による空気力の変化

3. 1. 1 表面の形状による抗力の変化

図3は、32枚パネル（パネルとパネルの間はボンド接着式）で製作された5種類サッカーボールに対するボールの抗力の特性曲線を示したものである。各サッカーボールの抗力係数をみると、Bタイプのディンプルタイプのサッカーボールが他のタイプのサッカーボールに比べてより早く落ちる傾向が見られた。また、Eタイプの均等な四角形の形状で構成されたサッカーボールは、全体の風速区間で他のボールより大きな抗力を示している。さらに、キックや強力なシュートで使われるスピード区間（20m/s～35m/s）ではAタイプの四角形の形状のサッカーボールが、他のサッカーボールより小さな抗力を示した。

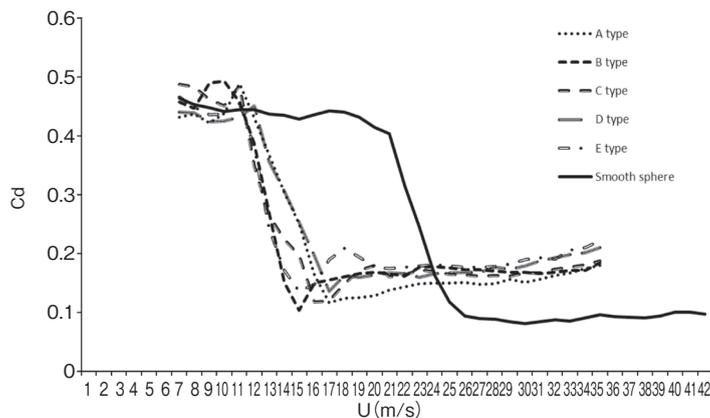


図3 表面形状が異なる5種類のサッカーボールの流速(U)に関する抗力係数(Cd)の変化

また、超臨界の抗力係数ではBタイプのディンプルタイプのサッカーボールが約0.10 ($Re = 2.3 \times 10^5$) で一番小さな値を示しており、Dタイプ番の六角形の形状のサッカーボールは約0.14 ($Re = 2.7 \times 10^5$) で相対的に大きな値を示した。一方、Aタイプの四角形の突起のような形状で製作されたサッカーボールは約0.11 ($Re = 2.7 \times 10^5$)、Cタイプの三角形の突起の形状のサッカーボールは約0.11 ($Re = 2.5 \times 10^5$) を示した。従って、本研究で製作し、検討した32枚パネルのサッカーボールでは、超臨界に到達するスピードではディンプルタイプの方が最も早い事が分かった。これは、同一なパネル数とパネル形で構成されたサッカーボールでも、そのボールの表面の形(形状)によってボールに働く抗力が変わる事が示唆される。

3. 1. 2 表面の形状差による揚力及び横力の 変化

図4のグラフは、パネルの表面の形状が違う5種類のサッカーボールに対して、流速の増加(20m/s及び30m/s)による横力と揚力における力の変化を示した物である。グラフをみると、各々サッカーボールのパネルタイプによって、揚力と横力の力変化が少し変わる事が分かった。また、ボールのタイプによる力の変化が違うが、同じボールのタイプでは揚力と横力の力変化には同様

な傾向が見られた。

流速を20m/sから30m/sへ増加すると、Dタイプのボール表面に六角形模様があるサッカーボールにおける揚力と横力の力変化(図4、D_20 & D_30)が、他の4つのタイプのボールに比べて小さな値を示すことが確認できた。特に、強力なシュートで使用されるスピード区間(30m/s)での揚力と横力の力変化をみると、ボール表面が六角形であるサッカーボールが1.5Nと1.0Nになっており、他のタイプ(Aタイプは2.0Nと2.2N、Bタイプは2.6Nと2.6Nで、Cタイプは2.3Nと2.0N)より小さな値を示した。これは、ボールの上下左右に作用する力の変化が小さいことで、飛翔する際に他のタイプのボールに比べ、不規則な変化が少ない軌道になると考えられる。

4. 考 察

本研究では、サッカーボールの表面の模様(表面突起)がボールの空力特性に及ぼす影響について風洞実験を用いて検討した。その結果によると、サッカーボールの表面の凸凹などの意匠によってボールに加える空気力が大きく変化する事が確認できた。本研究の結果から、最新サッカーボールの空力特性が明らかになるだけでなく、今後開発されるサッカーボールの空力特性と飛翔特性が予測可能になると期待できる。

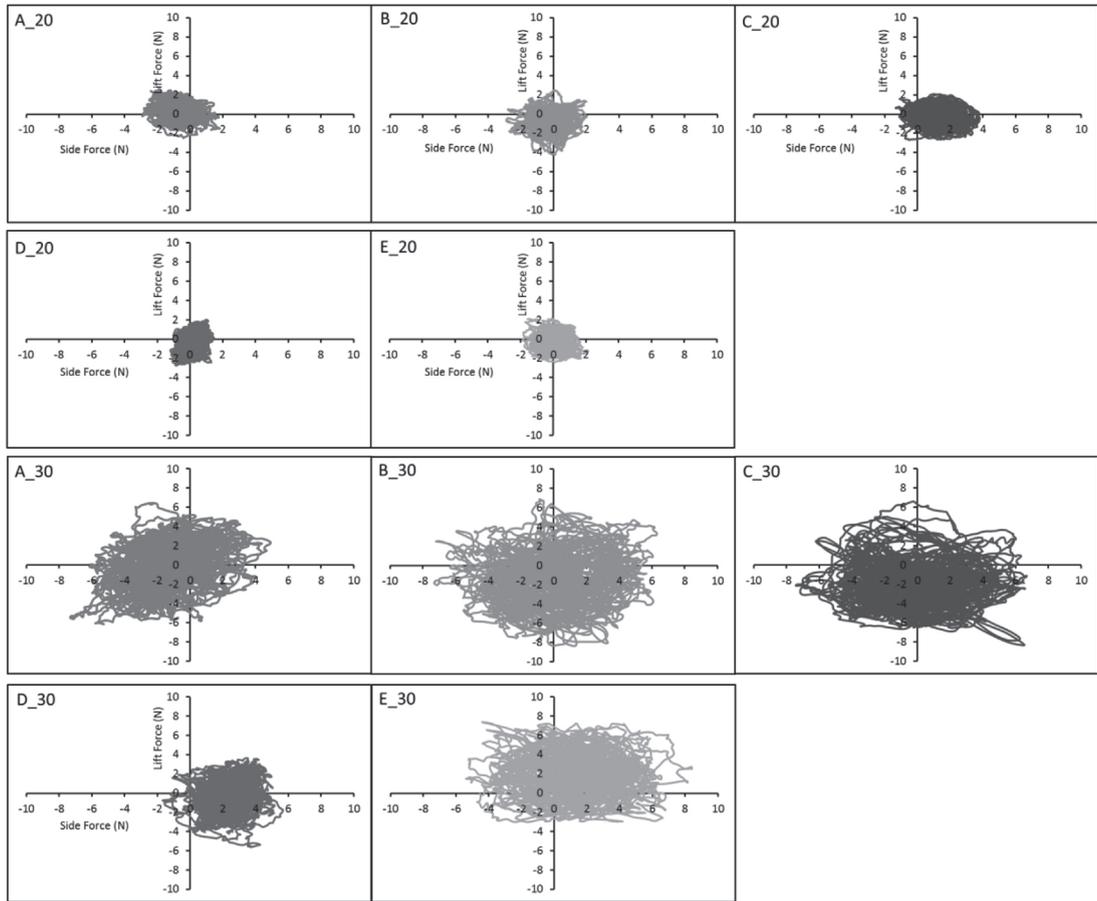


図4 サッカーボール表面形状による揚力と横力の力変化 (例:A_20は、風速20m/sでのAタイプにおける力変化を示す)

表面の形状を変えて製作した5種類のサッカーボール (32枚パネル) における抗力の変化では、中間スピード区間 (10m/s ~ 20m/s) ではディンプルが入ったタイプのボール (Bタイプ) が他の表面形状のサッカーボールに比べて小さな空気抵抗を示したため、中間スピード区間では相対的にボールスピードが速く感じると考えられる (図3)。また、揚力と横力の変化についても表面の突起によってボールに加える力が大きく変わることが分かった (図4)。このようにサッカーボール表面の形状によってボールに働く空力が変わる事から、サッカーボールの空力特性を決定する要因にはパネルの形や数だけではなく、ボール表面形状も重要な要因の1つであると示唆される。

従って、サッカーボールの空力特性は、同様なパネル数やその形で構成されたサッカーボールでもその表面形状の変更によって違う特徴 (速度や方向など) になるので、今後開発するサッカーボールでは、ボール表面の形状をどのようにするかが重要かつ必要になると考えられる。

最近、サッカーボールに関する流体力学的研究では、サッカーボールのパネル数や向き又は、その形の変化がボールの空力特性に大きな影響を与えると報告している^{2,14)}。また、本研究の結果でも先行研究と同様な結果を示した。特に、本研究では、サッカーボール表面の形状を変える事でボールの空力特性が変わる事が明らかになった。これは、これまでサッカーボールにおいてパ

ネルの数や形の変化から得られたた空力特性の変更を、パネルの形変更だけではなく表面の形状変更によって、より多様な空力特性を持つサッカーボール開発が可能になる事を示唆する。さらに、本研究の結果から少ないパネル数（2枚又は4枚、6枚など）で構成されたサッカーボールに突起などの様々な表面形状を投入することで一般的な32枚のサッカーボールが持つ空力特性と同様な空力特性のサッカーボールが可能になると考えられる。さらに、これらの結果から、今後開発されるサッカーボールの空力特性や飛翔特性が予測可能になると考えられる。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサント科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Goff, J.E., Asai, T. and Hong, S., A comparison of Jabulani and Brazuca non-spin aerodynamics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: *Journal of Sports Engineering and Technology*, **228**: 188-194(2014)
- 2) Hong, S. and Asai, T., Effect of panel shape of soccer ball on its flight characteristics., *Sci. Rep.*, **4**: 5068(2014)
- 3) Alam F., Chowdhury H., Moria H., Fuss F.K., Hkan I., Aldawi F., and Subic A. Aerodynamics of contemporary FIFA soccer balls., *Procedia Engineering*, **13**: 188-193(2011)
- 4) Alam, F., Chowdhury, H., Stemmer, M., Wang, Z., and Yang, J., Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics, *Procedia Engineering*, **34**: 146-151(2012)
- 5) Asai, T., Ito, S., Seo, K., and Koike, S., Characteristics of modern soccer balls, *Procedia Engineering*, **34**: 122-127(2012)
- 6) Asai, T. and Seo, K., Aerodynamic drag of modern soccer balls, *SpringerPlus*, **2**: 171(2013)
- 7) Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O. and Sakashita, R., Fundamental aerodynamics of the soccer ball, *Sports Engineering*, **10**: 101-110(2007)
- 8) Mizota, T. et al. The strange flight behaviour of slowly spinning soccer balls., *Sci. Rep.*, **3**: 1871, doi: 10.1038/srep01871(2013)
- 9) Oggiano, L. and Sætran, L., Aerodynamics of modern soccer balls., *Procedia Eng.*, **2**: 2473-2479(2010)
- 10) Mehta R. D., Aerodynamics of sports balls., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **17**: 151-189(1985)
- 11) Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O. and Sakashita, R., Fundamental aerodynamics of the soccer ball., *Sports Eng.*, **10**: 101-109(2007)
- 12) Passmore, M., Rogers, D., Tuplin, S., Harland, A., Lucas, T. and Holmes, C., The aerodynamic performance of a range of FIFA-approved footballs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: *J. Sports Eng. Technol.*, **226**: 61-70(2012)
- 13) Goff, J. E. and Carré, M. J., Trajectory analysis of a soccer ball., *Am. J. Phys.*, **77**: 1020-1027(2009)
- 14) Hong, S., Asai, T. and Seo, K., Visualization of air flow around soccer ball using a particle image velocimetry., *Sci. Rep.*, **5**, 1510812(2015)
- 15) Achenbach, E., The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres., *J. Fluid Mech.*, **61**:113-125(1974)
- 16) Carré, M. J. and Barber, S., A novel sports ball aerodynamics analysis tool: soccer ball design., *Sports Technology*, **3**:240-252(2012)
- 17) Barber, S. and Carré, M.J., The effect of surface geometry on soccer ball trajectories. *Sports Engineering*, **13**: 47-55(2010)