

サッカーボールの空力

浅井 武*, 洪 性賛*, 瀬尾 和哉**

Aerodynamics of Soccer Balls

Takeshi ASAI, Sungchan HONG and Kazuya SEO

1. 緒 論

これまで、スポーツボールの空力特性に関する研究では、Thompson¹⁾の先駆的研究の後、ボールの抗力係数(C_d)やディンプル形状²⁾³⁾⁴⁾について研究がなされてきている。また、クリケットボール⁵⁾や野球ボール⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、テニスボール¹⁰⁾¹¹⁾、バレーボール¹²⁾等に関する研究もおこなわれ、Mehta¹³⁾によってレビュー論文も報告されている。

サッカーボールの空力特性に関する研究は、6角形と5角形のボールパネルで構成される32枚パネルの典型的なサッカーボールを対象として行われてきた¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

しかし、大きな大会の公式球として用いられサッカーボールのパネル数は32枚から14枚(Adidas Teamgeist II; Beijing Olympic games 2008)、8枚(Adidas Jabulani; FIFA World cup 2010 South Africa)と年々減少傾向にあり、その空力特性に関する報告は少ない¹⁵⁾。さらに、UEFA Eurocup 2012やLondon Olympic games 2012で用いられる最新のサッカーボール(Adidas Tango 12; 32panels)は、再度パネル数が増えて、曲線を含んだ新形状の32枚パネルとなっており、その空力特性を明らかにすることが求められている。

そこで本研究では、新サッカーボール(Adidas Tango 12; 32panels)と従来の3種類のサッカーボール(Adidas Roteiro; 32 panels, Adidas Teamgeist II; 14 panels, Adidas Jabulani; 8 panels)の抗力係数や臨界レイノルズ数を、風洞を用いた定常解析により比較し、最新サッカーボールの空力特性を検討する。そして、それらの結果から、新変形32枚パネルサッカーボールの空力特性は、14枚パネルや8枚パネルのボールとは異なり、旧32枚パネルボールに回帰傾向であることを示す。

2. 方 法

風洞実験には、吹き出し口サイズ縦0.7 m、横0.7 mのエッフェル塔型低速風洞を用いた(Fig. 1)。計測対象のボールは、FIFA公認5号球であり、32枚パネルボール(Adidas Roteiro, UEFA Eurocup 2004)、14枚パネルボール(Adidas Teamgeist II, UEFA Eurocup 2008)、8枚パネルボール(Adidas Jabulani, FIFA World cup 2010 South Africa)、変形32枚パネルボール(Adidas Tango 12, UEFA Eurocup 2012)の4種類とした(Fig. 2)。ボールは背面より直径10mmの支柱で支え、実験直前に空気圧がゲームの条件を満たしていることを確認し(0.9気圧)セットした。各ボールは、ボールパネルが左右方向に幾何学的対象になるようにセットした。従って上下方向では、ボールパネルは非対称となっていた。風速範囲は7~30m/sとし、サンプリング周波数は1KHzで、計測時間は8.192秒間とした。揚力、横力は、15、20、25及び30m/sのケースのみ、約66秒間計測し、高速フーリエ変換と平均偏差を用いて、その非定常特性を検討した。ボールパネル接合部の総延長距離は、キルビメーター(Concurve 10; KOIZUMI Sokki Mfg. Co., Ltd.)を用いて計測した。

JabulaniとTango 12の抗力係数が飛翔軌跡と飛翔距離に及ぼす影響を比較検討するため、2Dの単純な飛翔シミュレーションを行った。風洞実験で計測されたレイノルズ数と抗力係数の関係を用い、ボール初速度17 m/s、及び28 m/s、飛び出し角度は共に25 deg.で2次元飛翔軌跡を算出した。また、ボールインパクトの力積(17 m/s; 7.45 kgm/sと28 m/s; 12.26 kgm/s)が同様であったという仮定の基に、Jabulani(0.438 kg)とTango 12(0.428 kg)のボールの質量差を考慮し、Jabulaniの初速度が17 m/s、及び28 m/sのケースに対して、Tango 12の初速度を17.4 m/sと28.7 m/sに設定した場合についても2次元飛翔軌跡を算出した。また、横力、揚力の変動を検討するため、実際に飛翔するボール周りの流れを、発煙物質をボールに塗布し、可視化実験¹⁷⁾を補助的に行った。

* 筑波大学体育系
(〒114-0034 つくば市天王台 1-1-1,
E-mail: asai@taiiku.tsukuba.ac.jp)

** 山形大学地域教育文化学部



Fig.1 Experimental setup with wind tunnel.



a



b



c



d

Fig. 2 Photograph of Adidas Roteiro (a; smooth surface with 32 panels consisted of pentagonal and hexagonal panels), Adidas Teamgeist II (b; small protuberance with 14 panels), Adidas Jabulani (c; small ridges or protrusions with 8 panels) and Adidas Tango 12 (d; small grip texture with modified 32 panels).

3. 結果

2.1 抗力

本実験で用いたサッカーボールのパネル接合部総延長距離は、Adidas Roteiro が 3840 mm, Adidas Teamgeist II が 3470 mm, Adidas Jabulani が 1980 mm, Adidas Tango 12 が 4470 mm であった。

各ボールの臨界レイノルズ数は、Roteiro が $\sim 2.2 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.12$), Teamgeist II が $\sim 2.8 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.13$), Jabulani が $\sim 3.3 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.11$), Tango が $\sim 2.4 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.15$) であった (Fig. 3).

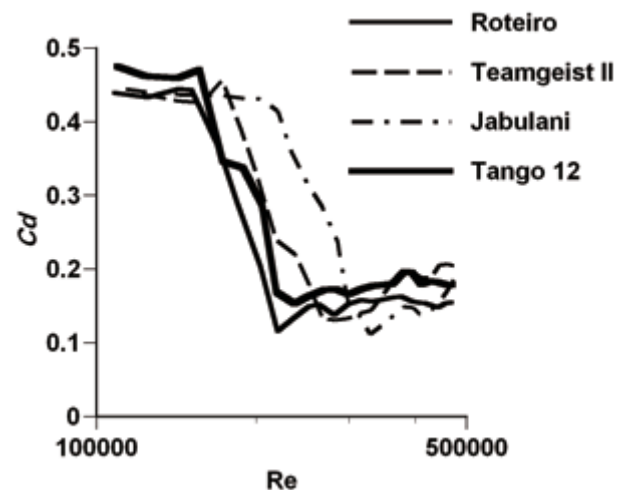


Fig. 3. Drag coefficient (Cd) of the Roteiro, Teamgeist II, Jabulani, and Tango 12. The critical Reynolds number of the respective balls was $\sim 2.2 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.12$), $\sim 2.8 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.13$), $\sim 3.3 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.11$), and $\sim 2.4 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.15$).

この Roteiro の臨界レイノルズ数は, Asai *et al.* (2007)¹⁵⁾ の報告と同様の値であった. Achenbach (1972)¹⁸⁾ は, 平滑球の臨界レイノルズ数を $\sim 3.5 \times 10^5$ としており, Bearman, and Harvey (1976)²⁾ は, ゴルフボールの臨界レイノルズ数を $\sim 6.0 \times 10^4$ と報告している. したがって, 本研究におけるサッカーボールの臨界レイノルズ数は, 平滑球より小さく, ゴルフボールより大きな値であることがわかった. Tango の超臨界領域 (super critical regime) における C_d の平均値は ~ 0.18 であり, Jabulani の ~ 0.15 より, やや大きな値を示した. また, Tango の亜臨界領域 (sub critical regime) における C_d の平均値は ~ 0.47 であり, Jabulani の ~ 0.44 より, やや大きな値を示した. Roteiro, Teamgeist II, Jabulani と年代を追うごとに, 臨界レイノルズ数が増大し, 抗力係数カーブは右側にシフトする傾向を示したが, Tango の抗力係数カーブは, Jabulani より Roteiro に近い傾向を示した. ボール飛翔シミュレーションにおいて, 初速 17 m/s, 飛び出し角 25 deg. の初期条件では, Jabulani の飛距離は 17.5 m であるのに対して, Tango 12 は 19.5 m であった (Fig. 4). 初速 28 m/s, 飛び出し角 25 deg. の初期条件では, Jabulani の飛距離は 47.1 m であるのに対して, Tango 12 は 44.1 m であった. また, 同じボールインパクトの力積 (7.45 kgm/s と 12.26 kgm/s) でのシミュレーション場合, 7.45 kgm/s のケースでは, Jabulani (17 m/s) の飛距離は 17.5 m であるのに対して, Tango 12 (17.4 m/s) は 20.4 m であった. 12.26 kgm/s のケースでは, Jabulani (28 m/s) の飛距離は 47.1 m であるのに対して, Tango 12 (28.7 m/s) は 45.7 m であった. また, パネル接合部総延長距離と各ボールの臨界レイノルズ数には, 高い相関がみられた ($r = 0.9$) (Fig. 5).

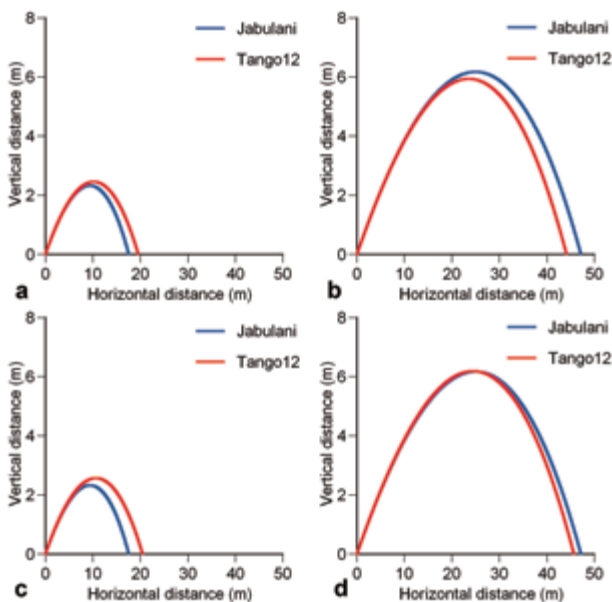


Fig. 4. Flight trajectory of the Jabulani and the Tango 12 in a simple 2D flight simulation. (a) Initial ball velocity: 17 m/s. (b) Initial ball velocity: 28 m/s. (c) Impulse of ball impact: 7.45 kg/s. (d) Impulse of ball impact: 12.26 kg/s. Ball launching angle in all cases: 25°.

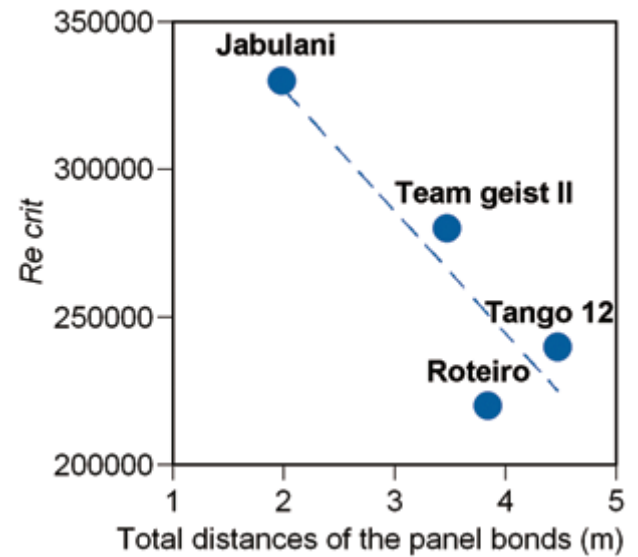


Fig. 5. Correlation between the extended total distances of the panel bonds and the critical Reynolds number ($r = 0.9$).

2.2 横力と揚力

FFT による横力と揚力のパワースペクトルにおける振幅 (Amplitude) は, ボール-スティング系の固有振動数と推定される 12Hz, 20Hz 以外の領域では, 10Hz 以下が比較的大きな値を示す傾向がみられた. Jabulani の横力と揚力の合力散布図において, 流速が 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s と大きくなるにつれ, 横力と揚力の不規則な変動が増大する傾向がみられた (Fig. 6a-c). また, Tango においても, 流速が大きくなるにつれ, 横力と揚力の変動が増大する傾向を示した (Fig. 6d-f). この傾向は, 他のボールにも同様にみられた.

各ボールにおける, 横力の標準偏差は, Jabulani の 15 m/s を除き, 流速が 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s と大きくなるにつれ, 増大する傾向を示した (Fig. 6g). その中では, Teamgeist II の 25 m/s, 30 m/s 時がやや小さな値を示した. 各ボールにおける, 揚力の標準偏差は, 流速が大きくなるにつれ, 増大する傾向を示した (Fig. 6h). 流速が 20 m/s, 25 m/s では, Roteiro がやや大きな値を示し, 30 m/s では, Roteiro と Tango がやや大きな値を示した.

実際に飛翔するサッカーボール (32 panels) 後流の渦構造は¹⁹⁾²⁰⁾ 継続的に変化しており 19,20 ボール進行方向に対して偏向が観察された (Fig 7a-f). この傾向は他の試技にも同様にみられた. 境界層の剥離点は, 変動していることが観察された. ボール後流には, しばしば 2 本の縦渦がみられ, ボール進行方向を軸としたラージスケールの回転も観察された (Fig. 7b, 7c, 7e, 7f). また, 縦渦構造のラージスケールの回転は, 後流渦の偏向を引き起こしていた. しかし, この縦渦構造は不安定であり, 崩壊, 消失したり, 明確でない場合も多くみられた.

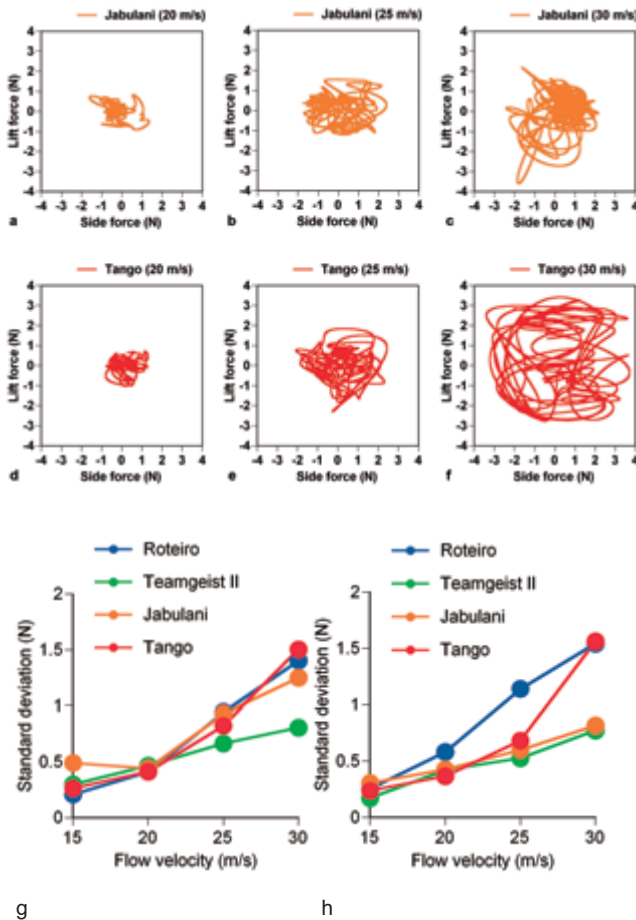


Fig. 6. Net force scatter plots of the side force and the lift force for the Jabulani and the Tango 12 balls and the standard deviation of the respective forces for each flow velocity (5 s). As the flow velocity increases from 20 m/s (a, d) to 25 m/s (b, e) and 30 m/s (c, f), the irregular fluctuations of the side and lift forces increase. The standard deviation of the side (g) and the lift force (h) increased as the flow velocity increased.

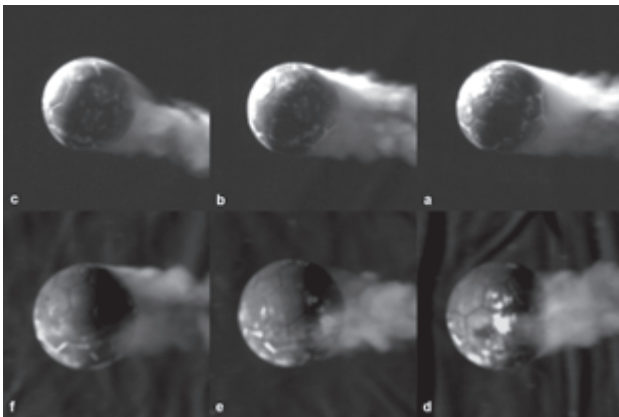


Fig. 7. Sequence of video images showing the deflection stages in the near-wake flow (unpublished data). Side views (a, b, and c) and top views (d, e, and f) of a normal straight ball. The initial ball velocity is 27

m/s. The flow direction is from left to right. The time after impact progresses from (a) to (c) and from (d) to (f), as shown below each image. The time interval of each image is 50 ms. The near-wake flow near the ball deviated asymmetrically in the flight direction. In the ball wake, two longitudinal vortices and a large-scale spin with the axis aligned with the ball's direction of movement (b, c, e, and f) were observed.

3. 考察

各ボールの臨界レイノルズ数は、Roteiro, Teamgeist II, Jabulani とボールパネル数が減少するに従って、大きくなる傾向を示している。また、ボールパネル数が減少するに伴い、パネル接合部総延長距離も小さくなる傾向を示した。そして、Tango は再びボールパネル数が 32 枚になっており、それに伴ってパネル接合部総延長距離が増大し、臨界レイノルズ数も、同じ 32 枚パネルの Roteiro と近い値を示している。Achenbach (1974)²¹⁾は、平滑球において形状表面のラフネスの増大が、臨界レイノルズ数の低下をもたらすことを報告している。これらのことから、パネル接合部総延長距離が大きなボールほどボール表面のラフネスが増大し、結果的に臨界レイノルズ数が小さくなる傾向があると考えられる。一方、Roteiro のパネル表面は比較的スムーズであり、Teamgeist II には小円形突起、Jabulani には小山形突起、Tango には小グリップテクスチャが、それぞれデザインされている。しかし、Roteiro の臨界レイノルズ数が小さいことや、Jabulani のそれが大きいことから、パネル表面の小さなデザインのラフネスへの影響は、パネル接合部総延長距離に比べて小さいと思われる。従って、本実験範囲内におけるサッカーボールの臨界レイノルズ数は、パネル表面の小さなデザインより、パネル接合部総延長距離の影響が大きいと考えられる。

Tango の臨界レイノルズ数が Jabulani のそれより小さいことから、Tango の臨界領域近傍の中速領域 ($11 < U < 19$ m/s) では、Tango は Jabulani より空気抵抗が小さいボールになっていると考えられる。また、超臨界領域の高速領域 ($20 < U < 29$ m/s) では、Tango は Jabulani より、空気抵抗が大きいボールになっていると考えられる。飛翔軌跡シミュレーションにおいても、17 m/s の初速の場合、Jabulani の飛距離より Tango の方が、2.0 m 大きく、28 m/s の初速の場合、逆に Jabulani の飛距離より Tango の方が、3.0 m 小さくなっている。同様に、同じボールインパクトの力積 (7.45 kgm/s と 12.26 kgm/s) でのシミュレーションでは、ボール質量の小さい Tango の飛距離が増大し、Tango の抵抗係数が小さい中速領域では、飛距離の差が 2.9 m と増大し、Tango の抵抗係数が大きい高速領域では、逆に飛距離の差が、1.4 m と縮小している。以上のことから、最新サッカーボールの一つである Tango 12 は、Jabulani 等より中速領域での空気抵抗が小さく、その領域で飛ばしやすいボールであると考えられる。この

ことは、中速領域を多用するパスのスピードが上げやすいことを意味し、パスサッカーに比較的適したサッカーボールであると推測される。

横力と揚力における変動する非定常力の標準偏差は、共に流速が大きくなるほど増大する傾向を示しているが、臨界レイノルズ数やパネル接合部総延長距離と明確な関係はみられない。しかし、大域的には、Tango と Roteiro は、高速領域において比較の変動が大きい傾向にあり、Tango と Roteiro は類似した横力と揚力特性を持っていると考えられる。また、横力と揚力で各標準偏差が異なっている原因として、パネルや表面デザインの非対称性や、ボールを支えるスティング等の影響が考えられるが、詳細は今後の課題である。

可視化実験におけるボール後流の剥離点や渦構造は時間と共に細かく変化しており、横力や揚力の変動^{22),23)}に影響を与えていると考えられる。ボール後流に、しばしば観察される、ラージスケールでの2本の縦渦構造は、Taneda (1978)²⁴⁾が平滑球について報告した渦構造と類似の構造であると考えられ、高レイノルズ流れにおける球体渦構造の本質的特徴の一つであると思われる。この縦渦構造が進行方向軸回りにラージスケールで回転すると、後流に偏向を生ずる場合が多く、横力や揚力の不規則な変動の原因の一つになっていると考えられる。しかし、この縦渦構造は不安定であり、崩壊、消失したり、明確でない場合も多くみられた。また、後流渦構造と不規則な変動力の大きさとの関係は明らかではなく、サッカーボールの無回転や低回転時に発現する「Knuckling effect」¹⁷⁾との関係も今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、最新サッカーボール (Adidas Tango 12; 32panels) と従来のサッカーボール (Adidas Roteiro; 32 panels, Adidas Teamgeist II; 14 panels, Adidas Jabulani; 8 panels) を対象に、実験風洞を用いて抗力係数や臨界レイノルズ数を検討した。結果を以下に要約する。

1. 各ボールの臨界レイノルズ数は、Roteiro が $\sim 2.2 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.12$), Teamgeist II が $\sim 2.8 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.13$), Jabulani が $\sim 3.3 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.11$), Tango が $\sim 2.4 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.15$)であった。
2. Tango の臨界領域近傍の中速領域($11 < U < 19$ m/s)では、Tango は Jabulani より空気抵抗が小さいボールになっていると考えられ、超臨界領域の高速領域($20 < U < 29$ m/s)では、Tango は Jabulani より、わずかに空気抵抗が大きいボールになっていると考えられる。
3. 各ボールの臨界レイノルズ数とパネル接合部総延長距離とは、高い相関がみられた($r = 0.9$)。
4. Roteiro のパネル表面は比較的スムーズであり、他のボールには小さな突起等がデザインされているが、ラフネスへの影響は、パネル接合部総延長距離に比べて小さいと思われる。

参考文献

- 1) Thompson, J. J. The dynamics of a golf ball. *Nature* 85, 2151–2157 (1910).
- 2) Bearman, P. W. & Harvey, J. K. Golf ball aerodynamics. *Aeronaut. Q.* 27, 112–122 (1976).
- 3) Davies, J. M. The aerodynamics of golf balls. *J. Appl. Phys.* 20, 821–828 (1949).
- 4) Smits, A. J. & Ogg, S. in *Biomedical Engineering Principles in Sports* (eds. Hung, G. K. & Pallis, J. M.) pp. 333–364 (Kluwer Academic, New York, 2004).
- 5) Mehta, R. D., Bentley, K., Proudlove, M. & Varty, P. Factors affecting cricket ball swing. *Nature* 303, 787–788 (1983).
- 6) Watts, R. G. & Sawyer, E. Aerodynamics of a knuckleball. *Am. J. Phys.* 43, 960–963 (1975).
- 7) Watts, R. G. & Ferrer, R. The lateral force on a spinning sphere: Aerodynamics of a curveball. *Am. J. Phys.* 55, 40–44 (1987)
- 8) LeRoy, W., Alaways, L. W. & Hubbard, M. Experimental determination of baseball spin and lift. *J. Sports Sci.* 19, 349–358 (2001).
- 9) Nathan, A. M., Hopkins, J., Lance, C & Hank, K. The effect of spin on the flight of a baseball. *Am. J. Phys.* 76, 119–124 (2008).
- 10) Štěpánek, A. The aerodynamics of tennis balls: The topspin lob. *Am. J. Phys.* 56, 138–142 (1988).
- 11) Zayas, J. M. Experimental determination of the coefficient of drag of a tennis ball. *Am. J. Phys.* 54, 622–625 (1986).
- 12) Wei, Q., Lin, R. & Liu, Z. Vortex-induced dynamics loads on a non-spinning volleyball. *Fluid Dyn. Res.* 3, 231–237 (1988).
- 13) Mehta R. D. Aerodynamics of sports balls. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 17, 151–189 (1985).
- 14) Bray, K. & Kerwin, D. G. Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick. *J. Sports Sci.* 21, 75–85 (2003).
- 15) Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O. & Sakashita, R. Fundamental aerodynamics of the soccer ball. *Sports Eng.* 10, 101–109 (2007).
- 16) Goff, J. E. & Carré, M. J. Trajectory analysis of a soccer ball. *Am. J. Phys.* 77, 1020–1027 (2009).
- 17) Asai, T. & Kamemoto, K. Flow structure of knuckling effect in footballs. *J. Fluid. Struct.* 27, 727–733 (2011).
- 18) Achenbach, E. Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 54, 565–575 (1972).
- 19) Sakamoto, H. & Haniu, H. The formation mechanics and shedding frequency of vortices from a sphere in uniform shear flow. *J. Fluid Mech.* 287, 151–171 (1995).
- 20) Yun, G., Choi, H. & Kim, D. Turbulent flow past a sphere at $Re=3700$ and 104. *Phys. Fluids* 6, 15–19 (2003).
- 21) Achenbach, E. Vortex shedding from sphere. *J. Fluid Mech.* 62, 209–221 (1974).

- 22) Williamson, C. H. K. & Roshko, A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *J. Fluids Struct.* 2, 355–381 (1988).
- 23) Brika, D. & Laneville, A. Vortex-induced vibration of a long flexible circular cylinder. *J. Fluid Mech.* 250, 481–508 (1993).
- 24) Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . *J. Fluid Mech.* 85, 187–192 (1978).