球の表面構造と空力特性の関係 (風洞実験における球の支持方法の影響) _{水澤 卓斗^{*1} 岡永 博夫^{*2} 花岡 慎^{*3} 中田 皓太^{*3}}

The Relationship between Surface Structure and Aerodynamic Characteristics of Balls (Effect of the Differences in Support Method of Balls in Wind Tunnel Experiments)

by

Takuto MIZUSAWA^{*1}, Hiroo OKANAGA^{*2}, Shin HANAOKA^{*3} and Kota NAKADA^{*3} (Received on Mar. 29, 2016 and accepted on Jul. 7, 2016)

Abstract

Many studies have examined the aerodynamics of soccer balls. In most of these studies, experimental balls are supported by three methods: piano wire, cobra support, and wire support. The purpose of this study is to clarify the influence of the support methods on aerodynamic characteristics of balls, wire support and piano wire. The results show that, the drag coefficient of balls supported by piano wire is higher than that of balls supported by wire support in the supercritical region for smooth balls or balls with no grooves. However, there is no difference in drag coefficient for balls supported by wire support and piano wire in all regions for balls having panels or grooves. In addition, the side force of all balls supported by piano wire is higher than that of balls supported by wire support by wire support, due to the vibration in all directions.

Keywords: Soccer ball, Wire type, Drag coefficient, Side coefficient, Flow visualization

1. 緒言

サッカーのワールドカップなどで球技が人気を集めて いる.特に近年,サッカーなどの球技ではブレ球が注目 されており,これらの変化球が試合の決め手になってい る.したがって,球の空力特性を把握することは試合に 勝つために必要な要素の一つとなっている.

風洞実験での主な球の支持方法を Fig.1 に示す.いず れも風は左から右へ流れている.



Fig.1 Various types of support or method for sphere.

*3 工学部機械工学科学部生

ピアノ線支持装置は、球にピアノ線を貫通させて、ピ アノ線の上下を固定して支持する装置である. コブラ型 装置は、土台に設置した支柱で球の後方一点で支持する 方法である. ワイヤー型装置は、支柱で球の後方一点で 支持する点はコブラ型装置と同様であるが、支柱をフレ ームに固定したワイヤーで支えている.

過去の伊藤氏らの研究ではボールの支持方法による空 力特性への影響を調べている.この結果,球の後方一点 で支持するコブラ型装置とワイヤーで球を固定するワイ ヤー型装置では、ほぼ空力特性への違いが見られないこ とが示されている¹⁾. また, 瀬尾氏らの研究では, ピア ノ線を使用して球を支持するピアノ線支持法とコブラ型 装置の性能の比較を行っている²⁾. その結果, ピアノ線 支持では亜臨界領域を測定することに長けており、コブ ラ型装置は臨界領域を測定することに長けていることが 示されている. さらに、著者らの過去の研究ではパネル 数やパネルの形状の違うモデルボールで表面構造の変化 が空力特性に及ぼす影響について調べている³⁾. その結 果,モデルボールのパネル数が少ないほど,臨界レイノ ルズ数が高くなることが示されている.しかし、この研 究ではピアノ線支持でしか行われていない. 先述のとお り、ピアノ線支持法では亜臨界領域での測定に優れてい るが,臨界領域や超臨界領域での測定には向いていない.

^{*1} 工学研究科機械工学専攻修士課程

^{*2} 工学部機械工学科教授

そのため、臨界領域、超臨界領域での結果の信憑性に欠ける.また、伊藤氏らの研究では、ワイヤー型装置とコブラ型装置それぞれで測定した空力特性の比較は1種類の公式球のみで、データ数に疑問が残る¹⁾.

本研究では、伊藤氏らの文献¹⁾を参考に、ワイヤー型 実験装置を作製し、風洞装置による抗力、横力測定と油 膜法による可視化実験を行い、瀬尾氏らのコブラ型装置 の実験結果²⁾や、著者らの過去のピアノ線支持での実験 結果³⁾と比較し、ワイヤー型装置の球への空力特性への 影響を明らかにするとともに、球の表面構造が空力特性 に及ぼす影響を正しく測定することを目的とする.

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

改良したワイヤー型装置を Fig.2 に示す. フレームに L 字鋼を使用し, 寸法は幅 500mm, 高さ 550mm, 奥行き 300mm とした. さらに図の赤枠で示した装置の上下左右 にアクリル板を4か所取り付けることで,外乱による影 響を防いだ.実験球はボールの曲面に合わせた厚さ1mm, \$\phi\$30mm のアルミ板を接着剤で取り付け, 直径 6mm のス テンレス鋼製の中実棒を介して, 直径 2mm のワイヤー4 本で実験装置の中心で固定されている.



Fig.2 Wire type experimental apparatus.

Fig.3 に著者らの過去の研究で用いたピアノ線支持装置を示す³⁾. 寸法は幅 500mm, 高さ 500mm で球に直径 2.6mm のピアノ線を貫通させ, フレームの中心で固定している.



Fig.3 Piano wire type experimental apparatus.

2.2 抗力・横力測定実験

実験に使用した吹き出し型風洞の概略図を Fig.4 に

示す.風洞の吹き出し口は 400mm×400mm,風速は 15m/s ~60m/s,乱れ度は 0.3%以内である.ボールの抗力 D, 横力 S は歪型三分力計を使用してフレームにかかる力を 測定することによって計測する.なお,ボールを支える 支持棒とワイヤーにかかる力のみを別に計測して引くこ とで,ボールに働く力のみを測定している.サンプリン グ周期は 1000Hz,収録データ数は 2000 で得られた歪み 量の平均値より式(1),(2)を使用して抗力係数 C_D,横力 係数 C_Sを求めた.ここで,A:投影断面積[m²],U:流速[m/s], ρ :空気密度[kg/m³]である.なお,代表長さを球の直径と する.また,本実験のレイノルズ数は Re= $0.6 \times 10^5 \sim$ 4.0×10^5 である.



Fig.4 Schematic diagram of wind tunnel.

$$C_D = 2 \cdot D/(A \cdot \rho \cdot U^2) \tag{1}$$

$$C_S = 2 \cdot S/(A \cdot \rho \cdot U^2) \tag{2}$$

2.3 可視化実験(油膜法)

油膜は流動パラフィンとアマニ油を基本として、オレ イン酸と着色のために二酸化チタンを混合して使用する. これらの混合の割合は流動パラフィン 5ml,アマニ油 1ml, オレイン酸 1ml, 二酸化チタン 2g としている.

2.4 可視化実験(火花追跡法)

火花追跡法を用いた球周りの可視化実験の概略図を Fig.5 に示す.Fig.4 で示した吹出型風洞を使用し,実験 球の周りに直径 0.3mm のタングステンワイヤを設置す る.本研究では,高圧高周波パルス発生装置(菅原研究 所(株)製 MM-305AA 型および,パルストランス (UPT-300A型))を使用して,電極間に125×10³Vの電 位差を与えて,パルスを150×10⁻⁶s間隔で無回転状態で 可視化を行った.この際にスチールカメラでの撮影を実 験条件ごとに100枚ずつ行い,画像よりよどみ点から剥 離点までの角度を測定し,剥離位置の測定を行った.



Fig.5 Schematic diagram of spark tracing method.

2.4 実験球

実験に用いる滑面球, モデルボールを Fig.6 に示す. 写 真は抗力、横力測定と可視化実験において風を当てる面 である. 直径は滑面球が 200mm, モデルボールが 110mm である.また、本実験で使用するモデルボールはすべて PLA 樹脂を素材として 3D プリンターで作成した. Model 1~Model 5はパネル数を変化させたモデルボールである. Model 1 は三角形と五角形で構成した 32 枚パネル, Model 2 は三角形のみの 20 枚パネル, Model 3 は四角形と六角 形で構成した 14 枚パネル, Model 4 は五角形のみの 12 枚パネル, Model 5 は三角形と六角形で構成した 8 枚パ ネルである. なお溝深さを 0.8mm で統一している.



Fig.6 Experimental balls.

実験結果

3.1 滑面球

3.1.1 抗力・横力測定実験

著者らの過去のピアノ線支持による実験結果 3),本研 究で作製したワイヤー型装置での測定結果を Fig.7 に示 す. 抗力係数に関しては, 亜臨界領域においてワイヤー 型装置での測定結果はコブラ型装置での結果や、ピアノ 線支持での測定結果とほぼ近い値となった.一方で、臨 界領域においては、ピアノ線支持での抗力係数の減少が 緩やかであるが、ワイヤー型装置やコブラ型装置での測 定結果は抗力係数が急激に減少し、本実験での測定結果 はコブラ型装置での測定結果に近い傾向が得られた.

横力係数に関しては, 亜臨界領域ではピアノ線支持の 方が値が大きく, ワイヤー型の方がレイノルズ数による 値の変動が小さい.一方,臨界領域では,ピアノ線支持 がレイノルズ数の増加によって横力係数の値が小さくな るのに対し、ワイヤー型では増加したのちに減少する傾 向が見られる. ピアノ線支持では、ピアノ線を上下2点 のみで固定しているため, 前後の左右の振動が起きやす

く、剥離点が後方に移ったと考えられる. そのため、平 均値をとった抗力の測定ではピアノ線支持とワイヤー型 では値に大きな差が見られなかったが、エラーバーも大 きくなった.また,RMS 値で示した横力では、ピアノ線 支持の方が値が大きくなったと考えられる.





3.1.2 可視化実験

Fig.8 に超臨界領域(Re=4.0×10⁵)における,滑面 球の油膜法による可視化を示す.(a)が著者らのピアノ線 支持での過去の研究,(b)がワイヤー型装置での本実験の 結果である.なお、風は左から右に向かって吹いており、 重力方向は下方である. ワイヤー型装置での支持では, 図中の赤線で示したように、 ピアノ線支持に比べて球の 後方で剥離が起こっている.

(a) Experimental result of a smooth sphere supported by piano wire	
(b) Experimental result of a smooth sphere supported by wire type	

Fig.8 Oil film pattern on a smooth sphere (Re= 4.0×10^5).

油膜法の実験結果の画像を用いて, Fig.9 のようにボー ルの半径 r, よどみ点から剥離位置までの距離1とし, 式 (3)を用いて剥離点の角度 θ を求めた.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{r-l}{r}\right) \tag{3}$$



Fig.9 Definition of the oil film method.

亜臨界領域(Re=2.0×10⁵),臨界領域(Re=3.4×10⁵), 超臨界領域(Re=4.0×10⁵)における,著者らのピアノ線 支持を用いた過去の研究と³⁾,本実験のワイヤー型での 滑面球の剥離点角度を比較したグラフを Fig.10 に示す. Fig.10 より, 亜臨界領域においてはピアノ線支持, ワイ ヤー型ともに剥離点角度が80°付近となり、青木氏らの 油膜法による可視化実験の結果と一致するものである⁴⁾. 臨界領域においては、ピアノ線支持では94°であるの に対し、ワイヤー型では 114°と、ワイヤー型の方が約 20°後方に移動した. 超臨界領域でも剥離点角度はワイ ヤー型の方が約10°後方に存在している.瀬尾氏らの研 究⁽²⁾のように、ピアノ線貫通部の影響を受けないコブラ 型装置やワイヤー型装置は、球表面の場所によらず乱流 遷移が起こるのに対し、ピアノ線支持の場合はピアノ線 貫通部が層流剥離線近傍にあるために、ピアノ線貫通部 分から剥離しており、ピアノ線が流れの剥離や乱流遷移 に影響を及ぼし球表面で同じ角度で乱流遷移が起きない. このため、ピアノ線貫通部の前方で剥離する亜臨界領域 では、コブラ型装置や本実験のワイヤー型装置での結果 に近い抗力係数の値が測定できるのに対し, 臨界領域や 超臨界領域では抗力係数の下がり方が緩やかとなってい ると考えられる.したがって、滑面球においては、臨界 領域の途中(Re=3.5×10⁵付近)までは, ピアノ線支持を含 め支持方法によらずほぼ正確に測定できるが、ワイヤー の影響で剥離点が前方に移動しその結果抗力が大きく測 定されるため正確な Cn 値は測れない. しかし, 臨界領 域の Re 数の範囲は Re=3.5×10⁵~4.0×10⁵とほぼ同じで あり,臨界領域の範囲を調べるには問題ないと思われる.





3.2 モデルボール

3.2.1 抗力·横力測定実験

No Groove(相対粗さ: 2.45×10⁻⁶)の抗力, 横力の測 定結果をワイヤー型とピアノ線支持で比較したグラフを Fig.11 に示す. なお、ピアノ線支持の結果は、著者らの 過去の結果を引用した³⁾. No Groove の抗力係数は, 亜 臨界領域ではワイヤー型, ピアノ線支持ともにほぼ等し い結果となった.しかし、臨界領域、超臨界領域では結 果に違いが見られた. ワイヤー型では臨界レイノルズ数 が Re=3.0×10⁵~3.2×10⁵ と範囲が非常に狭いのに対し, ピアノ線支持では、Re=2.6×10⁵~3.2×10⁵の範囲となっ た. また, 超臨界領域での抗力係数も, ワイヤー型が Cp=0.15 付近であるのに対し、ピアノ線支持では、 Cp=0.23 付近となっている. このピアノ線支持がワイヤ ー型と比較して、臨界レイノルズ数の範囲が広くなり、 超臨界領域において抗力係数が高めに測定される傾向は, 滑面球での実験結果と一致するものである.一方で、横 力係数においては, 抗力係数とは異なり亜臨界領域にお いて違いが見られた. ワイヤー型では, C_{S RMS}が 0~0.10 の範囲にあるのに対し、ピアノ線支持では CS RMS=0.15~ 0.33 となり、測定時の左右の振動が大きい.



Model 1~Model 3 の抗力, 横力の測定結果を, ワイヤ ー型装置とピアノ線支持で比較したグラフを Fig.12, Fig.13, Fig.14 に示す. なお, ピアノ線支持の結果は, No Groove と同様に著者らの過去の結果を引用した³⁾.



Fig.12 The drag and side coefficient (Model 1).





抗力に関しては, Model 1, Model 2, Model 3 ともに, 概ねピアノ線支持の結果とほぼ同じような傾向の値となった. No Groove では球表面にパネルや溝が存在しないため,滑面球の時と同様にピアノ線貫通部による影響を受けるのに対し,球表面にパネルや溝といった表面構造を有する Model 1, Model 2, Model 3 では,表面凹凸の影響がピアノ線貫通部の影響よりも大きく,測定方法による影響が小さいと考えられる.横力については, Model 1, Model 2, Model 3 ともに亜臨界領域において,ワイヤー型はピアノ線支持より値が低くなった. さらに,ピアノ線支持よりレイノルズ数による値の変動が小さく, No Groove と似た傾向となった.

ピアノ線支持とワイヤー型での、モデル球の臨界レイ ノルズ数とパネル数の関係を Fig.15 に示す.なお、臨界 レイノルズ数は抗力測定において、抗力係数が急激に減 少する臨界領域の始まりから終わりの範囲のレイノルズ 数をエラーバーで示し、その中央値をプロットで示した. Fig.15 より、Model 1~Model 5 では、ワイヤー型装置と ピアノ線支持の臨界レイノルズ数では、ほぼ差が見られ なかった.しかし、No groove においてはピアノ線支持 の方がワイヤー型装置での支持に比べて臨界レイノルズ 数が小さくなる結果となった.これは、抗力測定実験の 結果より、滑面球での可視化実験と同様にピアノ線貫通 部が層流剥離点付近にあるため、ピアノ線が剥離に影響 を及ぼしたためと考えられる.さらにモデルボールのパ ネル数による臨界レイノルズ数の変化は見られなかった.



Fig.15 The critical Re and panel number of model balls.

3.2.2 可視化実験



Fig.16 Experimental result of oil film method (critical region).

臨界領域での No Groove と Model 1~Model 5 の油膜 法による可視化実験の画像と, Model 1, Model 2, Model 4 の火花追跡法による可視化実験の画像を Fig.16 に示す. なお油膜法においては, Fig.8 の滑面球同様, 風は左から 右に向かって吹いており, 重力方向は下方である. これ らの画像を用いて, 滑面球の時と同様に Fig.9 の方法で よどみ点からの剥離点までの角度 θ を計測した. 油膜法による臨界領域での計測結果を Fig.17 に, 超臨 界領域での計測結果を Fig.18 に示す. なお, ピアノ線支 持の測定結果は, 著者らの過去の実験結果より引用した³⁾. また, 火花追跡法による剥離点の計測結果を, 臨界領域 を Fig.19 に, 超臨界領域を Fig.20 に示す. 測定レイノル ズ数は臨界領域で, Model 1: Re= 1.4×10^5 , Model 2: Re= 2.0×10^5 , Model 3: Re= 1.6×10^5 , Model 4: Re= 1.6×10^5 , Model 5: Re= 2.0×10^5 , 超臨界領域で, Model 1: Re= 2.4×10^5 , Model 2: Re= 2.4×10^5 , Model 3: Re= 2.4×10^5 , Model 4: Re= 2.4×10^5 , Model 5: Re= 2.4×10^5 , Fig.20 K 5: Re= 2.4×10^5 , Re= 2.4×10^5



Fig.17 The relationship of separation angle and panel number of model balls at critical region (oil film method).



Fig.18 The relationship of separation angle and panel number of model balls at super critical region (oil film method).



Fig.19 Relationship of separation angle and panel number of model balls at critical region (Spark tracing method).



Fig.20 Relationship of separation angle and panel number of model balls at super critical region (Spark tracing method).

Fig.17 より, ピアノ線支持では No Groove の剥離点角 度が 93°付近であるのに対し, Model 1~Model 5 では 110°付近となった.しかし, ワイヤー型ではこのような 傾向は見られず, No Groove, Model 1~Model 5 のすべて のモデルボールにおいて, 剥離点角度が 80°~90°の範 囲に収まっている.また, Fig.18 の超臨界領域の結果で は,全ての支持方法,モデルボールにおいて臨界領域よ りも剥離点角度が大きくなっている.また,臨界領域の 結果と同様の傾向が見られ,ピアノ線支持の Model 1~ Model 5 では,剥離点角度がピアノ線支持の No Groove や,ワイヤー型での全てのモデルボールより大きくなっ ている.

臨界領域,超臨界領域において,Model1~Model5の 剥離点が,ピアノ線支持に比ベワイヤー型の方が小さく なった原因として,剥離と再付着が発生し再度の剥離が 確認できなかった可能性がある.そこで,火花追跡法で も可視化実験を行った.Fig.19,Fig.20のワイヤー型によ る火花追跡法の結果から,臨界領域,超臨界領域の双方 において Model 1, Model 2, Model 4 の剥離点は,ピアノ 線支持による油膜法の剥離点とほぼ一致することが確認 できる.このため,油膜法でのワイヤー型の場合,Fig.16 のように表面の溝の影響で油膜が 90°付近で剥離して 再付着し,その後方で剥離するという正しい剥離点を把 握することが難しい.一般に球後方に馬蹄形の渦が発生 し、その渦が不規則に変動すると言われているが、ピア ノ線支持の場合はピアノ線の影響で、剥離位置をはっき り確認できたと考えている.

4. 結言

滑面球

- 新たに製作したワイヤー型装置は、亜臨界領域、臨 界領域でコブラ型装置での測定結果に近い抗力を測 定することができた。
- 2) 亜臨界領域においてはピアノ線支持、ワイヤー型、 コブラ型の支持方法による抗力係数への影響は見られない.しかし、臨界領域においては、ピアノ線支持の場合、抗力係数の減2少が緩やかで、最小値が ワイヤー型やコブラ型に比べて大きく、正しく測定できない.
- 3) 可視化実験では、亜臨界領域ではワイヤー型はピア ノ線支持とほぼ同じ位置で剥離するが、臨界領域、 超臨界領域では、ワイヤー型はピアノ線支持よりも 剥離点が後方に移動している。

モデルボール

 モデルボールの抗力においては支持方法の違いによる値の差が見られず、横力のみに値の差が見られた. 表面にパネルや溝などの粗さを持つ球の場合は、抗力係数に限ればすべての領域でピアノ線支持でも信頼できるデータを取ることが可能である. 以上より,滑面球や No Groove 球のように真球に近い 球の場合は,ワイヤー型やコブラ型装置を用いた方が, 空力特性を正しく測定することができる.一方,パネル や溝を有する球の場合は,抗力係数を把握するには,ピ アノ線支持でも正しく測定することが可能である.

参考文献

- 伊藤慎一郎、八江一至、荻野裕貴:サッカーボールの パネルの違いによるボール後流の違い、日本機械学会 流体工学部門講演会講演論文集 (2013).
- 2) 瀬尾和哉,浅井武,小林修:サッカーボールの風洞実 験における支持法の検討,日本機械学会シンポジウム 公演論文集[No.06-35], pp.73-78 (2006).
- 3) Takuto Mizusawa, Mohd Eqkhmal Abd Razak, Gou Yagi, Hiroo Okanaga, Katsumi Aoki, The Effects of Surface Structures to the Aerodynamic Characteristics of Soccer Ball with or without Rotation, Conference on Modeling Fluid Flow (CMFF'15), The 16th International Conference on Fluid Flow Technologies (2015).
- Aoki K, Muto K and Okanaga H, Mechanism of Drag Reduction by Dimple Structures on a Sphere (Fluid Engineering), Transactions of the JSME, Vol.76, No.770, pp.1473-1480 (2010).