

サッカーボールの表面構造と空力特性（溝体積の影響）

水澤 卓斗^{*1} 岡永 博夫^{*2} 河野 秀俊^{*3} 田代 健悟^{*3}

The Relationship between Surface Structure and Aerodynamic Characteristics of Soccer Balls (Effect of Seam Volume)

by

Takuto MIZUSAWA^{*1}, Hiroo OKANAGA^{*2}, Hidetoshi KAWANO^{*3} and Kengo TASHIRO^{*3}

(Received on Mar. 29, 2016 and accepted on Jul. 13, 2016)

Abstract

Many studies have examined the aerodynamics of soccer balls, focusing on groove depth, length, and so on. This study aimed to clarify the influence of aerodynamic characteristics for various groove volumes of soccer balls by conducting a wind tunnel experiments. The results showed that, in a case of without rotation, the critical Reynolds number becomes smaller as the ratio of the groove volume and the volume to ball volume increase, regardless of the size of the ball. Moreover, regarding official balls, the drag coefficient in the supercritical region becomes higher as the ratio of the groove volume to ball volume increases both of without rotation and with rotation.

Keywords: Soccer ball, Aerodynamic characteristics, Surface structure, Critical Reynolds number

1. 緒言

近年、様々な球技において変化球が使用されるようになり、ボールの飛翔軌道の変化が注目されている。サッカーでは、公式球の表面構造が大会ごとに変化しており、表面構造の変化が空力特性に影響を与えている。特にFIFA ワールドカップでは、2006年に公式球のデザインが大きく変わり、それまでの公式球に比べてパネル数が少なく、より真球に近いものとなった。その影響として無回転のシュートが出やすくなり、不規則な軌道を描くことが注目された。サッカーにおいて軌道変化するシュートは、試合の結果を左右する重要な要素である。このように、サッカーボールの表面構造の変化が空力特性に影響を与えることから、様々な研究がなされている。

これまでに、著者らの過去の研究では、パネル数を変化させたモデルボールを用い、パネル数と空力特性の関係について研究を行っている。この研究から、パネル数が増えると臨界レイノルズ数が下がる傾向にあることを明らかにしている¹⁾。また、八木氏らも同様に溝深さを变化させたモデルボールを作成し、溝深さと空力特性の関係について研究している。この研究から、溝深さのみを変化させた場合、溝の深さが深いほど遷移領域が低レイノルズ数側に移動することが明らかになっている。加えて、溝の深さが深くなるほど遷移後の抗力係数の値は高くなるということも明らかにしている²⁾。

さらに、瀬尾氏らは公式サッカーボールの縫い目であ

る溝の長さ、溝の深さを粗さのパラメータとして空力特性の評価を行っている。この研究から、溝の全長が長くなるほど、また、溝の深さが深くなるほど、臨界レイノルズ数が小さくなることが明らかになっている³⁾。

このように、サッカーボールの表面構造が空力特性に与える影響についての様々な研究がなされている。しかしサッカーボール縫い目である溝の深さや長さ、パネル数についての研究はされているが、実際のサッカーボールは溝深さ、長さやパネル数が様々であり、従来通りの議論では統一的に空力特性を表すことはできない。そこで本研究では、溝体積に着目し統一的に議論できないかと考え、様々なボールを用いて実験を行い、ボールの溝体積の変化が空力特性に与える影響について明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置および方法

2.1 溝体積の測定

実験球の溝体積を求めるにあたり、ポリエチレン樹脂を用いて溝部分の型取りを行った。溝体積の測定は、取った型を顕微鏡で撮影し ImageJ というソフトウェアを用いて溝断面積を求め、求めた溝断面積にボール表面の溝長さを掛けることで溝体積を求めた。溝断面積を求める際 40ヶ所を測定し平均値を求め、平均値をこの測定での溝断面積とする。なお、サッカーボールの型取りの際に樹脂をアクリル板で押さえることによってそれぞれのボールの曲率を考慮した。Fig.1 に溝部分の型の断面の様子を示す。

*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

*3 工学部機械工学科学部生

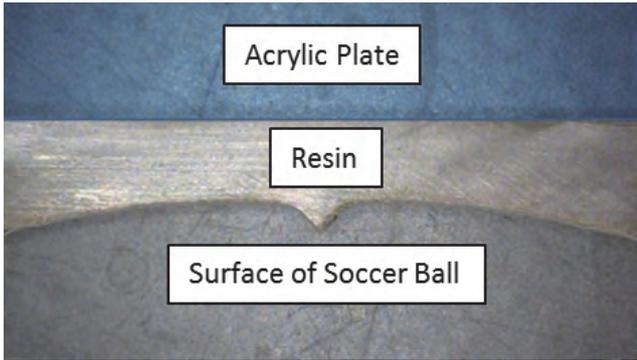


Fig.1 Cross section of a mold in the groove.

2.2 実験球

実験で使用した滑面球と5種類のサッカーボール公式球、表面構造を変化させた5種類のモデルボールを Fig.2 に示す。写真は抗力測定において風を当てる面を示している。



Fig.2 Experimental balls.

本実験で使用するモデルボールはすべて 0.125mm の積層型 3D プリンター（武藤工業，3D TOUCH トリプル）で製作した。素材は PLA 樹脂であり，出力時の表面粗さ 29 μm である。3D プリンターで出力後，サンドペーパーで球表面を磨きサーフェイサーを吹き付けている。

それぞれのボールの直径は，Smooth が 200mm，サッカーボールが 220mm，モデルボールが 110mm である。モデルボールは溝深さを 0.8mm で統一し，パネル形状を変化させたボールである。なお，本研究で使用したモデルボールは著者らの過去の研究や¹⁾，八木氏らで使用したものと同一である²⁾。

2.3 抗力測定実験

実験で使用した吹出型風洞の概略図を Fig.3 に示す。風速は 0~60m/s，風洞出口 400×400mm の吹出し型風洞を用いる。ボールは直径 2.5mm のピアノ線を用いて 500×500mm のフレームの中央に固定されており，球の中心から風洞の吹き出し口の位置は 175mm になるように設置している。また，回転実験時には，フレームの下部に取り付けたモータによって，サッカーボールは回転数 500rpm，モデルボールは式(1)のスピンパラメータ SP を合わせるために 1000rpm で回転させる。ボール及びワイヤーにかかる力は，歪型三分力計，センサーフェースを介して測定される。この時，サンプリング周期は 1000Hz，収録データ数は 2000 に設定してある。これをひとつの測定領域で計 5 回測定する。それぞれ得られた 2000 個の歪データの平均値を求め，その 5 つの値を平均した数値を 1 セットの値とし，実際には 5 セットの測定を行いこの測定領域での歪データとしている。得られたデータを用いて，式(2)より抗力係数 C_D を算出する。なお，本実験の測定レイノルズ数の範囲は滑面球と公式球が $1.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$ で，モデルボールが $0.6 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ である。

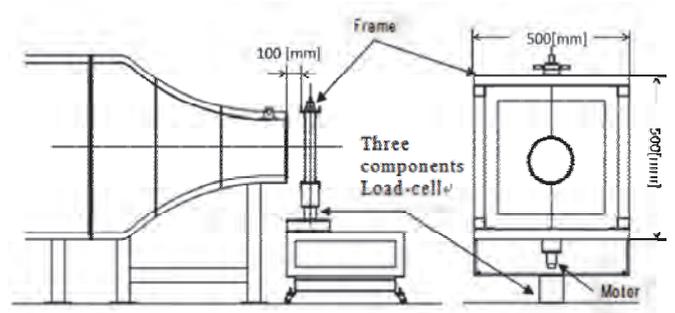


Fig.3 Schematic diagram of wind tunnel.

$$SP = \pi \cdot d \cdot N / U \quad (1)$$

$$C_D = 2 \cdot D / (A \cdot \rho \cdot U^2) \quad (2)$$

ここで， d ：球直径， N ：回転数， U ：流速， D ：抗力， L ：揚力， A ：投影断面積， ρ ：空気密度である。

3. 実験結果

3.1 溝体積の測定結果

溝体積の測定を行うに先立ち，型取りの精度を調査するために溝付き角柱の型取りを行った。実験に用いた供試角柱を Fig.4 に示す。角柱の溝高さ h ，幅 w ，溝間隔 d として各寸法はノギスを用いて測定した。角柱の寸法お

よび、ポリエチレン樹脂でとった型の測定結果を Table1 に示す。Table1 から、溝高さ h の誤差が溝幅 w や溝間隔 d と比べて大きいのは溝の奥まで樹脂が入っていなかったことが考えられる。しかし実際のサッカーボールの個体差はこれ以上であるため、問題ないレベルである。よって、ポリエチレン樹脂を用いてサッカーボールの溝の型取りを用いることができると考えられている。

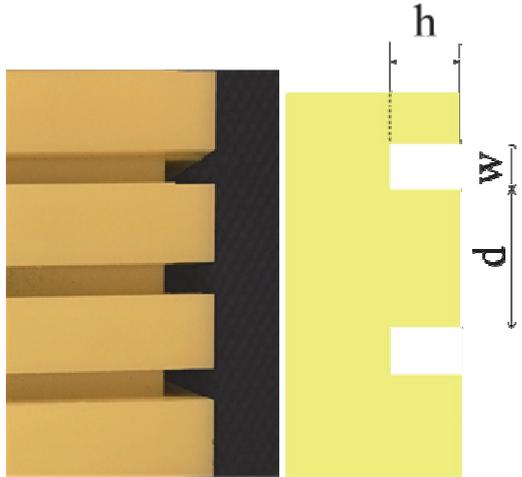


Fig.4 Square cylinder.

Table1 Precision of a mold.

	Width (w)	Height (h)	Division (d)
Square cylinder [mm]	2.01	2.01	7.86
Average of a mold [mm]	2.01	2.03	7.90
Error [%]	0.00	1.32	0.50

Table2 に、実験球における溝断面積と溝長さの測定結果と、溝体積および溝体積を球体積で割った値を示す。この値を用いた理由は考察と合わせて説明する。Table2 から、同じサッカーボールでも、ボールの種類によっての溝の断面積が異なっていることがわかる。表面のパネル形状や枚数も異なることから、溝長さは最も短い JABULANI と最も長い FINALE では約 3000mm 異なることがわかる。また、溝体積は MC5-WBL が一番大きく、次いで TANGO12, FINALE, Brazuca, JABULANI の順であることがわかる。さらに、溝体積が一番大きい MC5-WBL は一番小さい JABULANI の約 10 倍の値となっている。一方、モデルボールはすべて同じ断面形状で作成したため、溝断面積は等しい。しかし、パネルの枚数や形状などの表面形状が異なるため溝長さが異なる。そのため、溝体積はモデル 2 が一番大きく、次いでモデル 1, モデル 3, モデル 5, モデル 4, モデル 6 の順となった。

Table2 Result of seam volume measurement.

	Groove			Groove volume/ Sphere volume [$\times 10^{-3}$]
	Area [mm ²]	Length [mm]	Volume [mm ³]	
MC5-WBL	0.976	3930	3835	0.688
TANGO12	0.697	4518	3149	0.565
FINALE	0.537	5160	2770	0.497
Brazuca	0.515	3614	1861	0.334
JABULANI	0.199	2004	398	0.0715
Model 1	0.942	2129	2006	2.88
Model 2		1800	1696	2.43
Model 3		1332	1255	1.80
Model 4		1333	1256	1.80
Model 5		984	927	1.33

3.2 抗力測定実験（無回転実験）

Fig.5 に滑面球と No Groove の抗力測定結果を示す。No Groove は表面に粗さ（相対粗さ： 2.45×10^{-6} ）があるため、 $Re=2.6 \times 10^5$ 付近で臨界領域が始まっている。本実験では、このような表面構造を持つモデルボールを用いて溝の影響を調べた。なお、伊藤氏らの研究⁴⁾では、公式球において、表面に 0.5mm 程度のスタッドと呼ばれる突起（相対粗さ： 2.27×10^{-3} ）の有無による空力性能について研究しており、臨界レイノルズ数の変化には影響しないことが明らかになっている。また、表面構造を変化させたモデルボールの場合は、表面粗さの影響より溝の影響の方が大きいと本実験で溝の影響の調べることに關しては問題ない。

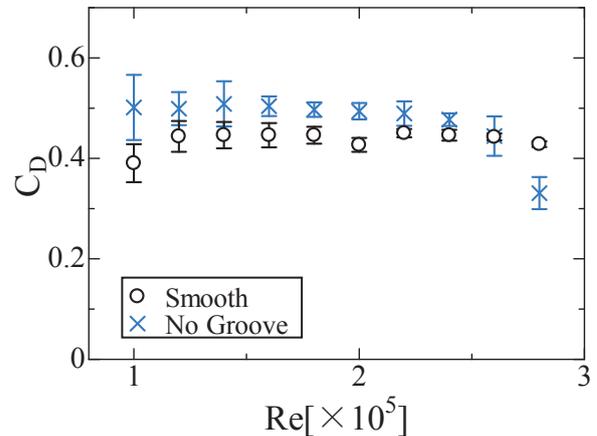


Fig.5 Drag coefficient of Smooth and No Groove.

公式球の抗力測定の結果を Fig.6 に示す。Fig.6 から、滑面球は遷移領域が $Re=3.2 \times 10^5 \sim 4.3 \times 10^5$ で表れていることがわかる。また、MC5-WBL は $Re=1.2 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$, TANGO12 は $Re=1.2 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5$, FINALE は $Re=1.2 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$, Brazuca は $Re=1.6 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5$, JABULANI は $Re=2.2 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ で遷移領域が現れており、いずれの公式球も滑面球に比べて遷移領域が低レイノルズ数側となっている。また、遷移領域後の抗力係数は、滑面球は上昇する傾向にあるが、MC5-WBL,

TANGO12, FINALE, Brazuca, JABULANI はほぼ一定の値となっていることがわかる. この結果は八木氏らの研究と類似する傾向である⁵⁾. さらに, 溝体積が大きいほど, 遷移領域が低レイノルズ数側で生じているが, TANGO12はこの傾向からは外れている.

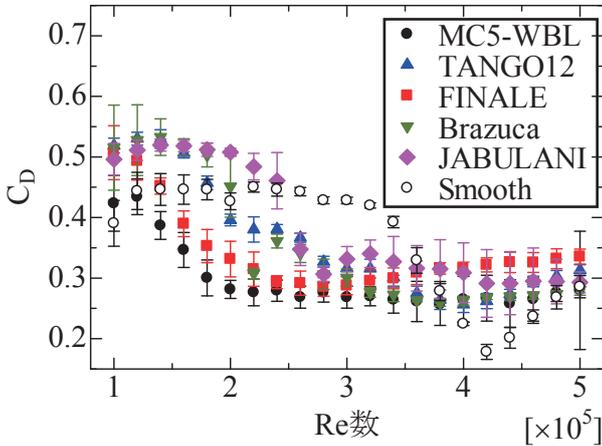


Fig.6 Drag coefficient of each soccer ball.

各モデルボールにおける抗力係数比較を Fig.7 に示す. モデル 1 は $Re=1.0 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$, モデル 2 は $Re=1.6 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$, モデル 3 は $Re=1.4 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$, モデル 4 は $Re=1.4 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$, モデル 5 は $Re=1.6 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5$ で遷移領域が表れていることがわかる.

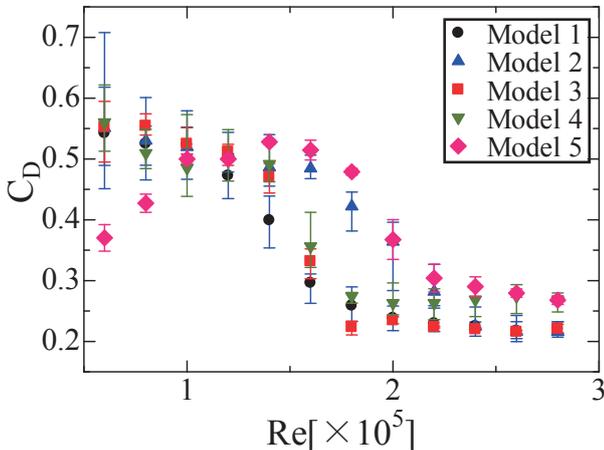


Fig.7 Drag coefficient of each model ball.

八木氏らの研究²⁾や瀬尾氏らの研究³⁾では, ボール表面のパネル数や溝の長さ, 深さで臨界レイノルズ数に関する大まかな傾向が示されている. しかし, パネル数が同じでも溝の長さが異なったり, 深さが異なる場合や溝の断面積自体が異なっている場合もあるため, 一部のボールでは傾向から外れており八木氏らの研究では 30%, 瀬尾氏らの研究では 60%, その傾向とは異なる値を持つボールも存在し, これらのパラメータそれぞれ 1 つだけでは傾向を示すことはできない. 一方, 木村氏らの研究⁶⁾

は, 表面粗さを変化させた球の抗力測定を行っており, 表面粗さが粗くなるほど臨界レイノルズ数が低レイノルズ数側へ移動することを明らかにしている. 従って, 球表面の凹凸を粗さ相当とみなすことが妥当ではないかと考えた. そこで, 本実験では溝体積を球表面積で割ったものが平均的粗さと考え, それを球直径で割ることで相対粗さと考えることとした. 実際には簡略化のため, 溝体積を球体積で割ったものを相対粗さとすることにした. 各実験球の溝体積と球体積の比および臨界レイノルズ数の関係を Fig.8 に示す. 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と終わりの範囲のレイノルズ数をエラーバーで示し, 中央値をプロットで示した. Fig.8 より, 球の溝体積と球体積の比が大きくなるほど, 臨界レイノルズ数が低レイノルズ数側へと推移することがわかる. しかし, その比が 0.0005 以下では変化が大きく, 0.001 以上となると, 比の大小が臨界レイノルズ数に与える影響が小さくなっている. なお, 八木らの結果³⁾では, 実際のボールとモデル球に関しては傾向が異なるため別々に議論している.

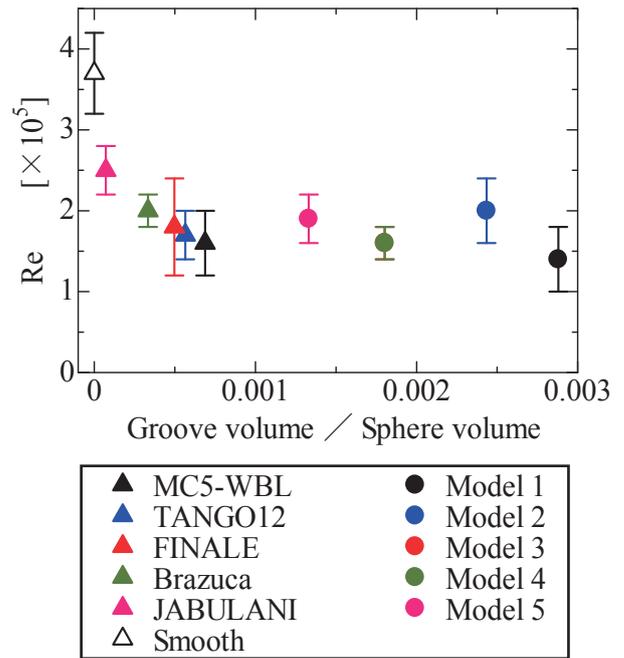


Fig.8 Relationship between a ratio of seam volume and the surface area of each ball and critical Reynolds number.

3.3 抗力測定実験（回転実験）

回転実験でのサッカーボール公式球のレイノルズ数と抗力係数の関係を Fig.9 に示す. $Re=2.6 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$ の範囲では, MC5-WBL が $C_D=0.37$, TANGO12 が $C_D=0.34$, FINALE が $C_D=0.40$, Brazuca が $C_D=0.32$, JABULANI が $C_D=0.30$ 付近でレイノルズ数によらず抗力係数がほぼ一定となっていることがわかる. MC5-WBL, FINALE, Brazuca, JABULANI では $Re=3.6 \times 10^5$ 以上でも同様に抗力係数はほぼ一定の値をとり続けるが, TANGO12 に関

しては、レイノルズ数が大きくなると抗力係数も大きくなっており、他の公式球とは異なる傾向を示している。

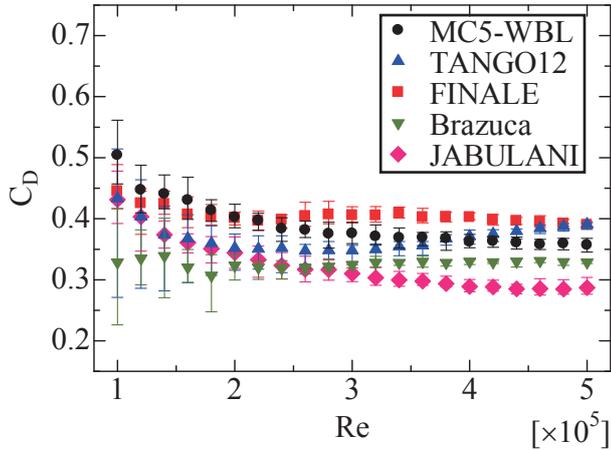


Fig.9 Drag coefficient of official soccer ball with rotation.

Fig.10 に各モデルボールのレイノルズ数と抗力係数の関係を示す。モデル1では $Re=0.8 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$ 、モデル2では $Re=0.8 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^5$ 、モデル3では $Re=0.8 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$ 、モデル5では $Re=0.8 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$ で遷移領域が確認できる。しかし、モデル4では測定したレイノルズ数の範囲内で遷移領域を確認することができない。

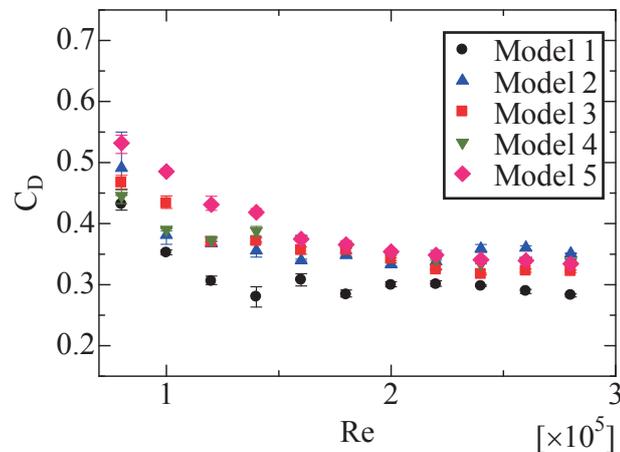


Fig.10 Drag coefficient of model ball with rotation.

Fig.11 に滑面球と公式球の超臨界領域 ($Re=4.8 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$) における無回転時と回転時それぞれについて、溝体積を球体積で割った値と抗力係数の関係を示す。グラフ中の直線は、無回転、回転時のそれぞれのプロットを最小2乗法で算出した1次近似式である。なお、公式球とモデルボールでは、回転比や超臨界領域となるレイノルズ数が異なり単純な比較はできず、今回は公式球のデータのみを示す。Fig.11 より、回転、無回転に関わらず溝体積と球体積の比が大きくなるほど、超臨界領域での抗力係数が増加する傾向となる。この結果は、八木氏らの過去の研究において溝深さが深くなるほど超臨界領域の抗力係数が大きくなるという結果と同じ傾向である。

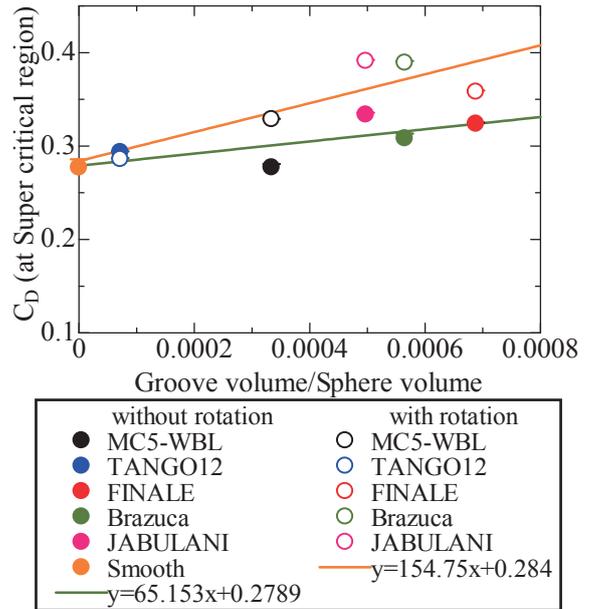


Fig.11 Drag coefficient of official soccer balls at critical Reynolds number.

4. 結言

1. 溝体積と臨界レイノルズ数の関係は、ボールの種類や大きさに関係なく、無回転時においては溝体積と球体積の比が大きいくほど臨界レイノルズ数が小さくなる。
2. 公式球においては、超臨界領域での抗力係数は回転、無回転に関わらず、溝体積と球体積の比が大きくなるほど、超臨界領域での抗力係数が増加する傾向がある。

参考文献

- 1) Takuto Mizusawa, Mohd Eqkmal 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).
- 2) Gou Yagi, Hiroo Okanaga, Katsumi Aoki THE EFFECT OF SURFACE STRUCTURES ON THE FLOW CHARACTERISTICS OF SOCCER BALL WITH OR WITHOUT ROTATION 2014 MJIT-JUC Joint International Symposium (2014).
- 3) 瀬尾和哉, 依田大輔, 永井大樹, 浅井武, 伊藤慎一郎: サッカーボールの空力特性に関する実験的研究, 可視化情報学会誌, Vol.32, No.1, pp345-348 (2012).
- 4) 伊藤慎一郎, 浅井武, 瀬尾和哉: サッカーボールの空力性能比較, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, Vol.2, No.09-1, pp279-280 (2009).
- 5) 八木豪, 岡永博夫, 青木克巳: スポーツで用いるボールの表面構造の違いに対する空力特性, 可視化情報学会誌, Vol.34, No.1, pp145-148 (2014).
- 6) 木村拓也, 岡永博夫: 球体の表面構造の系統的变化が空力特性に及ぼす影響, SAS Intelligent symposium (2013).