短軸回りに回転するラグビーボールの空力特性*

瀬尾和哉^{*1}, 小林 修^{*2}, 村上正秀^{*3}Aerodynamic Characteristics of a Rugby Ball
Spinning on Its Transverse AxisKazuya SEO^{*4}, Osamu KOBAYASHI and Masahide MURAKAMI^{*4} Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University,
1-4-12 Kojirakawa, Yamagata-shi, Yamagata, 990-8560 Japan

We have measured aerodynamic forces and moments acting on a rugby ball spinning on its transverse axis by wind tunnel experiments. A full-size model of a rugby ball was tested in a low-speed wind tunnel with a 1.5 m×1.0 m rectangular nozzle. It was made of fiber reinforced plastics by molding a fully-inflated ball. The spinning mechanism was composed of a motor and four shafts inserted the ball along its transverse axis. The results are summarized as follows: the lift increases with increasing the spin rate because of the Magnus force. The Magnus force is at its maximum when the spinning (transverse) axis is perpendicular to the flight direction. The side force depends on the angle between the spinning axis and the direction of flight. The side force is a maximum when this angle is 45°.

Key Words: Aerodynamic Forces, Kick for Goal, Rugby, Spinning Ball

1. 緒 言

ラグビーボールの飛しょうを回転に着目し, 分類すると三つに分けられる。長軸回りに回転するスクリーキック⁽¹⁾⁽²⁾, ほぼ無回転のハイパント⁽³⁾, 短軸回りに回転するゴールキックやドロップキックである。なかでもゴールキックは直接得点につながるキックで, 重要である。ゴールを成功させるためには, キックはある制限された初期条件の範囲でボールをけり出さなければならない。この条件を知るためには, ボールに働く空気力と飛しょう軌跡の計算が必須である。しかし, 短軸回りに回転するラグビーボールの空気力を測定した例はほとんどない⁽⁴⁾。

本論文では, ゴールキックを模擬した風洞実験について, その結果を報告する。短軸回りに回転するラグビーボールには, 回転による揚力(マグヌス力)とボール形状に起因する横力およびヨーイングモーメントが働くことが明らかになった。

記 号

C_D : 抗力係数
 C_L : 揚力係数
 C_n : ヨーイングモーメント係数
 C_Y : 横力係数
 D : 抗力 N
 L : 揚力 N
 N : ヨーイングモーメント N・m
 Sp : スピンパラメータ $= \pi \omega V_b^{1/3} / |\vec{V}|$
 SD : 標準偏差
 $\vec{V}$: 速度ベクトル m/s
 V_b : ラグビーボール体積 m³
 Y : 横力 N
 β : 回転軸(短軸)と $\vec{V}$ のなす角 °
 ρ : 空気密度 kg/m³
 ω : 回転速度 rev/s

2. 風 洞 実 験

短軸回りに回転するラグビーボールに働く空気力を測定した。風洞実験の概観を図 1(a) に示す。東海大学工学部航空宇宙学科のゲッチングン形低速風洞を使用した。吹出し口のサイズは, 1.5 m×1.0 m である。

* 原稿受付 2006 年 11 月 6 日。

^{*1} 正員, 山形大学地域教育文化学部(☎ 990-8560 山形市小川 1-4-12)。^{*2} 正員, 東海大学工学部。^{*3} 筑波大学大学院システム情報工学研究科。

E-mail: seo@e.yamagata-u.ac.jp

(a) View of the experimental set-up

(c) Molded rugby ball

(b) Molding

(d) Spinning mechanism

Fig. 1 Experimental set-up and rugby ball

この風洞にワールドカップ公式球であるギルバード社の実物大模型を備え付け、実験した。実物大模型は、以下の手順で制作した。

(1) 実際のボールに固形離型剤(3時間ごとに5回)と水性離型剤(12時間ごとに2回)を塗布して半球ずつ作業する。

(2) ボールにはけでゲルコート材を塗る。

(3) グラスマットを積層し、図1(b)の雌型を完成。

(4) 完成した雌型に(1)と同様の離型剤処理をする。

(5) 雌型にゲルコート材を塗り、さらに350番のグラスマットを積層する。

(6) 雌型から製品を取り出して完成。

完成した実物大模型は、肉厚0.6~0.8 mmで、片側約155 gである。熱収縮を防ぐため、一連の作業は恒温で行い、1%以内のひずみであった。ボールの縫い目および表面のぼつぼつ感も再現された。回転むらを抑えるため、縫い目のない側[図1(c)の右側]の

底の肉厚を若干厚くした。

ボールの短軸に沿って、図1(d)のように内部にモータ(AXU 425 A-A, Oriental Motor)を組み込んだ。このモータをモータコントロールユニット(AXUD 90 A, Oriental Motor)で制御した。回転速度は90~1 000 rpm程度まで変化可能である。

空気力と各変数の定義を図2に示した。図2の左図は上からの目線、右図は吹出し口からの目線である。ボールは短軸回りに回転しているが、図2では流入する風の速度ベクトル $\vec{V}$ と長軸が直交する瞬間、つまり投影面積が最大になる瞬間を描いた。当然、投影面積は回転に伴い、時々刻々変化する。回転する短軸と $\vec{V}$ のなす角を β 、回転速度を ω rev/sとした。また、ラグビーボールに働く空気力はストラットタイプの6分力てんびん(LMC-6524-50 S, Nissho Electric Works)で5秒間測定した。サンプリング周波数は1 000 Hzにした。風速 $|\vec{V}|$ は15, 20 m/s, ω は2~10 rev/s, β は0~90°の範囲に設定し、実験を行った。実際のゴールキックの $|\vec{V}|$ は26.4 m/s程度と報告さ

Fig. 2 Definitions of aerodynamic forces and characteristic parameters

れている⁽⁵⁾が、モータのトルク不足により、 $|\vec{V}| > 20$ m/s の領域では、特に低回転速度でボールを回転させることができなかった。ローリングモーメントとピッチングモーメントはほぼ零であったため、実質的には図2で示した抗力： D 、揚力： L 、横力： Y 、ヨーイングモーメント： N を測定した。

3. 実験結果

回転するボールに働く抗力 D と揚力 L の時間変化を $|\vec{V}| = 15$ m/s, $\omega = 2$ rev/s, $\beta = 90^\circ$ の場合について図3に示した。縦軸は電圧、横軸は時間である。縦軸の電圧は、ボールおよび支柱等に働く空気力と等価である。この図3では、両者に働く空気力の電圧を示したが、図4以下では、支柱等に働く空気力を差引くことにより、ボールのみに働く空気力を示した。

抗力 D と揚力 L とも1秒間に約4周期、5秒間では約20周期ある。これは、ラグビーボールに働く空気力が半回転で1周期分の変化をするためである。風に対して、投影面積が最大になる瞬間(ボール長軸と $\vec{V}$ が直交)に D は最大となり、投影面積が最小になる瞬間(ボール長軸と $\vec{V}$ が平行)に D は最小になる。抗力 D が最大もしくは最小になる瞬間に L は変動の最大と最小の間に位置する。両者の位相差は約 90° (0.0625 s)であった。また、 L の時間変化には、低周波数成分が存在する。この原因はモータのトルク不足と考える。低回転速度では、回転が安定するまでに時間を要した。目視で回転が安定したことを確認した後、データ収集したが、微小振幅の低周波数成分は存在した。

次に時間平均した空力係数を図4～7に示す。抗力係数 C_D をスピンパラメータ Sp の関数として図4に、揚力係数 C_L を図5、横力係数 C_Y を図6、ヨーイングモーメント係数 C_N を図7に示した。それぞれの定義は式(1)～(3)のとおりである。

Fig. 3 Time variations of the drag and the lift at $\beta = 90^\circ$ and 2 rev/s

Fig. 4 The drag coefficient, C_D , as a function of the spin parameter, Sp

Fig. 5 The lift coefficient, C_L , as a function of the spin parameter, Sp

Fig. 6 The side force coefficient, C_Y , as a function of the spin parameter, Sp

$$C_{D,L\&Y} = \frac{D, L \& Y}{1/2\rho|\vec{V}|^2 V_b^{2/3}} \quad (1)$$

$$C_n = \frac{N}{1/2\rho|\vec{V}|^2 V_b} \quad (2)$$

$$Sp = \frac{\pi\omega V_b^{1/3}}{|\vec{V}|} \quad (3)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V_b はボールの体積である。測定値より、 $V_b = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ とした。また、 Sp は、 $|\vec{V}| = 15 \text{ m/s}$ かつ $\omega = 10 \text{ rev/s}$ の場合 $Sp = 0.35$ 、 $|\vec{V}| = 20 \text{ m/s}$ かつ $\omega = 2 \text{ rev/s}$ の場合 $Sp = 0.053$ である。

図4より、 $\beta = 90^\circ$ では、 C_D は Sp にも $|\vec{V}|$ にもよらず、一定値の0.44になる。 $\beta = 45^\circ$ では、 C_D は Sp とともに減少する。実際のキックの条件である $Sp > 0.05$ 以上では、 C_D は Sp に対して直線的に減少する。また、 $\beta = 45^\circ$ では、風速(レイノルズ数)による差がある。過去に行われた回転するゴルフボール⁽⁶⁾の実験では、空力係数のレイノルズ数依存性が無視できる程度であったため、 Sp のみで整理されてきた。そこで今回もレイノルズ数依存性は実験誤差の範囲と考え無視し、 Sp のみでデータを整理した。短軸回りに回転するラグビーボール空力係数のレイノルズ数依存性については、今後の課題である。また、 β による C_D の大小比較をすると、 $\beta = 45^\circ$ のほうが $\beta = 90^\circ$ より大きい。この理由は、風に対する投影面積にある。ボールは短軸回りに回転しているが、 $\beta = 45^\circ$ のほうが時間平均した投影面積が大きいためである。図5より、 $Sp > 0.05$ 以上では、 C_L は Sp に対して直線的に増加する。 $|\vec{V}|$ 依存性はほとんどなく、 C_L の増加はマグナス力のためである。 β による C_L の大小比較をすると、 $\beta = 90^\circ$ のほうが $\beta = 45^\circ$ より大きい。差は Sp が小さい領域ほど大きい。 $\beta = 90^\circ$ では、回転軸と $\vec{V}$ が直交

Fig. 7 The yawing moment coefficient, C_n , as a function of the spin parameter, Sp

するため、最大のマグナス力となるが、 $\beta = 45^\circ$ では、回転するボールと $\vec{V}$ との相対速度が減少するため、マグナス力が小さくなる。図6と図7には C_Y と C_n を示した。実験結果では、 $\beta = 90^\circ$ で $C_Y = C_n = 0$ とはならなかった。この原因は、支柱が風にさらされているためと考える。滑面球の実験では、直径220 mmの滑面球に対して2 mmのピアノ線(直径比0.9%)で支持した場合でも横力とヨーイングモーメントは零にならなかった⁽⁷⁾。しかし、 $\beta = 90^\circ$ では、上流側からの視点で、ボールは幾何学的に左右対称となるため、 C_Y と C_n は零と仮定し、 $\beta = 90^\circ$ の $|C_Y|$ と $|C_n|$ 分を各 β のデータより、差引いた。図6より、 $\beta = 45^\circ$ では、 C_Y は負である。風に対して、投影面積が最大(ボール長軸と $\vec{V}$ が直交)となる瞬間には、 β によらず横力は働かない。しかし、それ以外の瞬間には、ボールの上流側に風が当たり、負の方向に横力が働く。その結果、時間平均した C_Y は $\beta = 90^\circ$ 以外で負になる。 $Sp > 0.05$ 以上では、 C_L は Sp に対して直線的に増加する。図7より、 $\beta = 45^\circ$ では、 C_n も負である。理由は、 C_Y と同様である。 $Sp > 0.05$ 以上では、 $|\vec{V}|$ に依存せず、 C_n は Sp に対して直線的に減少する。

以上、四つの空力係数を多項式で回帰する。回帰式は、飛ばし軌跡を計算する際に使用する。 Sp に関してはすべての空力係数を一次で、 β に関しては、 C_D と C_L は一次、 C_Y は三次、 C_n は二次で回帰した。 β の単位は度($^\circ$)である。各回帰式と実験データ間の差は、 C_D で $SD < 0.054$ 、 C_L で $SD < 0.048$ 、 C_Y で $SD < 0.056$ 、 C_n で $SD < 0.026$ であった。

$$C_D(Sp, \beta) = 8.59 \times 10^{-1} - 2.09 \times 10^{-1} Sp - (4.09 \times 10^{-3} + 2.57 \times 10^{-3} Sp) \beta \quad (4)$$

$$C_L(Sp, \beta) = (1.48 \times 10^{-3} + 6.64 \times 10^{-3} Sp) \beta \dots\dots\dots (5)$$

$$C_Y(Sp, \beta) = (-1.74 \times 10^{-2} - 3.21 \times 10^{-2} Sp) \beta + (8.62 \times 10^{-5} + 1.71 \times 10^{-3} Sp) \beta^2 + (1.20 \times 10^{-6} - 1.51 \times 10^{-5} Sp) \beta^3 \dots\dots\dots (6)$$

$$C_n(Sp, \beta) = (-4.89 \times 10^{-3} - 4.32 \times 10^{-3} Sp) \beta + (5.44 \times 10^{-5} + 4.80 \times 10^{-5} Sp) \beta^2 \dots\dots\dots (7)$$

4. ま と め

ラグビーのゴールキックを模擬するため、短軸回りに回転するラグビーボールの風洞実験を行った。その結果をもとに、抗力係数、揚力係数、横力係数、ヨーイングモーメント係数をスピンパラメータと回転短軸と風流入方向のなす角の関数として、多項式で表した。

本研究は、稲盛財団、石本記念デサントスポーツ科学振興財団、科研費・若手 A (18680045) の助成を受けて行った。感謝申し上げる。

文 献

- (1) Seo, K. et al., Flight Dynamics of the Screw Kick in

Rugby, *Sports Engineering*, Vol. 9, No. 1 (2006), pp. 49-58.

- (2) Seo, K. et al., Multi-Optimization of the Screw Kick in Rugby by Using a Genetic Algorithm, *Sports Engineering*, Vol. 9, No. 2 (2006), pp. 87-96.

- (3) Seo, K. et al., Regular and Irregular Motion of a Rugby Football During Flight, *The Engineering of Sport 5*, Vol. 1 (2004), pp. 567-573.

- (4) Takahashi, N. and Kobayashi, O., Auto-Rotation on Short Axis of Rugby Ball, *Mechanical Engineering Congress*, 2006 Japan, No. 06-1 (2006), pp. 123-124.

- (5) Holmes, C. et al., Ball Launch Characteristics for Elite Rugby Union Players, *The Engineering of Sport 6*, Vol. 1 (2006), pp. 211-216.

- (6) Naruo, T. and Mizota, T., Aerodynamic force measurement of a golf ball and 3D trajectory analysis, *Nagare*, Vol. 23 (2004), pp. 203-211.

- (7) Seo, K. et al., The Influence of a Supporting System on Aerodynamic Loads of a Soccer Ball in Wind Tunnel Test, *Proceedings of Symposium on Sports Engineering*, (2006), pp. 73-78.