

サッカーのナックルボールにおける非定常流体力

洪 性賛 浅井 武

Sungchan Hong and Takeshi Asai: Unsteady aerodynamic force on a knuckle ball in soccer. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 55: 553-563, December, 2010

Abstract : In this study, the unsteady aerodynamics of a knuckle ball in soccer were investigated. The characteristics of the fluid force, i.e. the magnitude and frequency acting on the knuckle ball, were analyzed through comparison with those of the straight ball using high-speed video cameras. Furthermore, the fluid flow around the knuckleball in flight was visualized using a smoke agent (titanium tetrachloride), and an attempt was made to clarify the fundamental fluid mechanics expressed by the knuckle ball as well as to analyze the vortex dynamics. It was found that the vertical acceleration of the knuckle ball tended to vary greatly (oscillate) in comparison with the acceleration of a straight ball, despite the fact that both are influenced by gravity. Moreover, in the case of the knuckle ball, the peak value of the vortex lift reached approximately 2.0 N, which was larger than the value of approximately 0.5 N for an in-step kick. This vortex lift fluctuated greatly with time and was thought to be a highly unstable phenomenon. When the large-scale vortex structure of the knuckle ball was studied, successively shed vortex loops transformed and merged, and a few massive vortices formed an extended vortex street structure. Moreover, when the vertical fluctuation along the wake axis of the large-scale vortex structure was studied, evidence of unsteady wave oscillation (undulation) was observed. This large-scale structure of the far wake was conjectured to indicate traces of vortex motion at the time of vortex shedding, and the effect of this motion was thought to have a direct influence on the motion of the ball. Furthermore, the knuckle ball was observed to have an average vortex lift force frequency of approximately 3.5 Hz. A comparison of this vortex lift frequency and a vortex oscillation frequency indicated that these frequencies tended to act in unison with a high statistical correlation ($r=0.83$, $p<0.01$). Thus, it is considered that the oscillation of the large-scale vortex structures of the knuckle ball was the fundamental mechanism responsible for creating the fluctuating forces acting on the knuckle ball.

Key words : soccer, ball, knuckleball, fluid mechanics, aerodynamics

キーワード : サッカー, ボール, ナックルボール, 流体力学, 空気力学

I 緒 言

スポーツにおいて、ボールが空気中を移動すると、必ず流体力学的影響を受ける。Rayleigh (1877) が、スポーツボールの空力的振る舞いに科学的考察を行なって以来、多くのボールの流体力学的研究が報告されており (Watts and Sawyer, 1975; Bearman and Harvey, 1976; Mehta et al., 1983; Watts and Ferrer, 1987), 研究レビ

ュー (Mehta, 1985) としてもまとめられている。

サッカーボールの空力特性に関する研究として Carré et al. (2002) は、ボール射出装置と高速ビデオカメラを用いて、飛翔するボールの軌跡と抗力係数 (C_D) と揚力係数 (C_L ; Magnus coefficient) を推定した。サッカーボールの C_D は、比較的狭いレイノルズ数 (Re) のレンジ ($2.5 \times 10^5 - 4.5 \times 10^5$) において、0.05から0.35の値を示した。 C_L は、スピンパラメータ (Sp) が0から0.5ぐらいまでは増加する傾向を示すが、それ

以降の C_L は、0.3程度の値で頭打ちになる傾向を示した。また、Carré et al. (2004) は、1/3スケールのミニチュアサッカーボール（32ボールパネルタイプ）を用いて風洞実験を行い、無回転、及び回転するサッカーボールの空力係数を検討した。無回転時の C_D は、 Re が 9×10^4 から 1.3×10^5 において0.5から0.2に急激に減少しており、このボールの臨界レイノルズ数 (Re_{crit}) は、 1.3×10^5 (9 m/s) であると判断された。回転時の C_L は、 Re に対する依存性がみられ、 Re が 9×10^4 のケースでは、逆マグナス力 (a negative Magnus force) が観察された。 Re が比較的高い 1.7×10^5 や 2.1×10^5 のケースでは、 Sp の増加に伴い C_L も増大する傾向を示した。また、定常状態における無回転、及び回転するサッカーボールの基礎空力特性を検討するため、フルスケールのボールを用いた風洞実験が実施された (Asai et al., 2007)。その結果、無回転時におけるレイノルズ数と抗力係数の関係をみると、亜臨界抗力係数は約0.43、超臨界抗力係数は約0.15を示し、2002年公式球（フィーバノバ）と2004年公式球（ロテイロ）は約 2.2×10^5 、2006年公式球（プラスチームガイスト）は約 3.0×10^5 が臨界レイノルズ数 (Re_{crit}) であると考えられた。また、回転ボールにおける実験では、ボール回転時の C_D は極めて強い Sp 依存性があること、 Sp が増加するに従って C_D も直線的に増加すること、 Sp が増加するに従って C_L がやや曲線的に増加することを示した。

しかし、これら一連の研究は、あくまで安定した定常状態における時間平均的空力係数を計測、推定することが中心となっており、非定常状態の空力特性を検討したものはほとんど無い。しかも、現代サッカーでは、無回転または低回転で飛翔するサッカーボールにおいて、飛翔軌跡が急激に落ちたり、揺れたりする非定常現象が「ナックルボール」として注目され (Asai et al., 2008)、そのメカニズムの解明が求められている。この「ナックルボール」では、キック直後の約 1/100 s に静止状態から 20–30 m/s へとボールが急激に加速することは一般のストレートボールと同様で

あるが、その後、空気抵抗によって減速しながら不規則に変化するという、一過性の過渡的現象を示し、本質的に非定常な解析が不可欠となる。

そこで本研究では、実際にキックされ飛翔するナックルボールに働く流体力やその周波数を、高速ビデオカメラを用いて分析し、その非定常空力特性について検討した。さらに、飛翔するナックルボール周りの流体を、発煙物質（四塩化チタン）を用いて可視化し、その渦動態を分析すると共に、ナックルボールが発現する流体力学的基礎メカニズムについて明らかにしようとした。

II 方 法

1. 非定常空力計測

ボールが蹴り足から離れ、空気中を移動するときに働く力は、重力と自然流を含む空気との相互作用である流体力が主なものと考えられる。重力はほぼ既知として考えられるが、流体力とその流体力学的メカニズムは、力を計測すると同時に流れを可視化して検討することが、きわめて重要である (Achenbach, 1972)。そこで本研究では、実際にボールをキックさせその運動軌跡を計測すると同時に、発煙物質をボール表面に塗布し、ボール周りの空気流れを可視化した。

被験者（キッカー）は、キック技術が比較的高いと考えられる大学サッカー選手 3 名を対象とし、ほぼ無回転、又は低回転のボール（ナックルボール）を各被験者 40 本ずつの計 120 本、ゴールに向かってキックさせた。分析対象試技は、サッカー指導経験 10 年以上の指導者 3 名が観察して、ナックリングエフェクトが顕著に発現され、かつゴール正面に飛翔したと考えられた試技 10 本とした。なお、本研究はナックルボールを分析対象としたものだが、その比較参考資料として、インステップキックによるストレートボールを 3 本補足収録した。サッカーゴール正面 25 m の地点にボールを静止してブレースし、その側方 4 m の地点に高速ビデオカメラ (1000 fps) と準高速ビデオカメラ (300 fps) の 2 台をセットし、各試技を撮影した (Fig. 1)。準高速ビデオカメラ

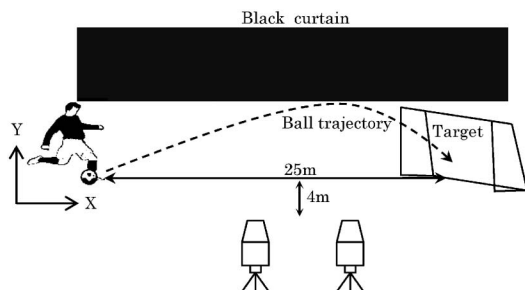


Fig. 1 Setup of experiment.

は、試技全体に渡るボールと渦の挙動の観察、把握を目的とし、より、画角が狭く解像度が高い (1024×1024 pixel) 高速ビデオカメラの映像から、各ボールの座標値を求めた。飛翔するレンジの中盤から後半にかけてのボールの変化が、ゴールキーパーに大きな影響を及ぼすと推定されるため、高速ビデオカメラの画角はボール軌跡の中盤から後半を中心とした。従って、分析対象映像は、ボール軌跡の後半が中心の側方2次元映像である。また、本実験は、屋外でのフィールド実験であるため、自然流の影響は不可避である。自然流の影響を小さくするため、風速1m以下の環境で実験をセットアップし、可能な限り自然流が収まっているタイミングで各試技を行った。風速1mにおいてボールが受ける抗力は約0.1N以下であると推定されることから (Carré et al., 2002; Asai et al., 2007), 自然流が本実験の揚力、抗力に与える影響は比較的小さいと判断された。

分析対象映像は、カメラレンズの光学的歪みを含んだ映像であり、妥当な位置座標を求めるには、その歪みを除去することが不可欠である。そこで本研究では、レンズ歪みを除去するため、カメラ校正法 (久米・高岡, 1996) によるレンズ歪み補正を適用し、各映像の歪み補正処理を行った。本研究で用いたレンズ歪み補正フィルター使用前、後の画像を比較すると、レンズ歪みが改善されていることが分かる (Fig. 2)。また、本実験では、得られた位置座標に2階微分処理を行うため、位置情報の精度がきわめて重要である。

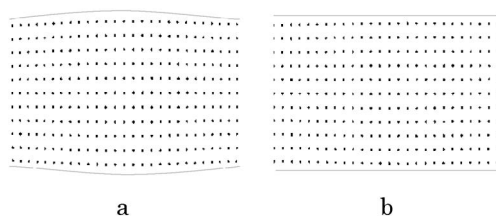


Fig. 2 Lens distortion calibration system using point correspondences (a: before calibration, b: after calibration, calibration error < 5%).

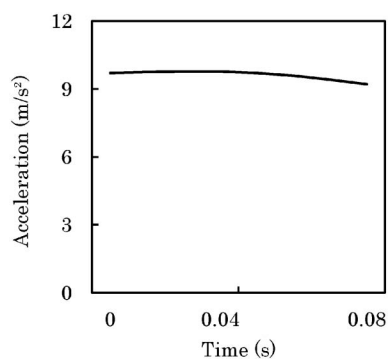


Fig. 3 Vertical acceleration in a free fall experiment using a soccer ball.

そこで、各試技のデジタイズに先立ち、本実験と同様のセットアップでボールの自由落下実験を実施し、その映像から得られる重力加速度を算出して比較検討した (Fig. 3)。本計測システムを用いてデジタイズした重力加速度の平均値は9.7 m/s²であり、標準重力加速度 (9.8 m/s²) と完全に一致はしなかったが、落下に対する空気抵抗等を考えると、計測許容範囲内であると判断され、以後の分析に本システムを用いた。デジタイズされた座標値より、1階微分、及び2階微分を行い、ボールの速度、加速度を算出した。その際、数値微分におけるデジタイズノイズの影響を低減させるため、1000 fps の速度で撮影された映像を125 fps へとダウンサンプリングした。さらに、そのローデータをみるとボールの動きとしては考えにくい高周波のノイズが観察されたので、それを除去するため各微分時にローパスフィルター (5点移動平均) を適用した。

また、ローパスフィルターの誤差を検討するた

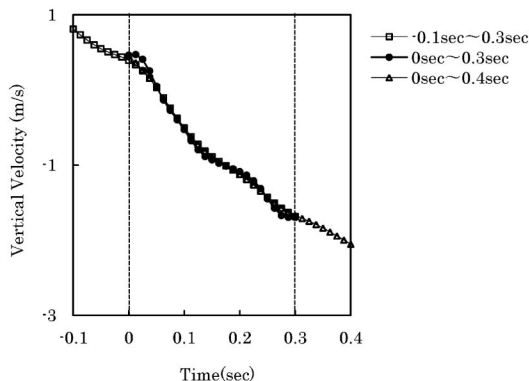


Fig. 4 An example of effect on lowpass filter in this experiment.

め、0秒から0.3秒の元データと-0.1秒から0.3秒までのデータ及び0秒から0.4秒までのデータに同様の処理をした場合とを比較した (Fig. 4). その結果、元データ (0秒から0.3秒) の最高点 (約0.01秒) に対して3.9%, 元データの最低点 (約0.23秒) に対して1.0%の誤差を示し、全体平均 (0秒から0.3秒) で1.0%の誤差を示した. 以上のことから、本研究で用いたフィルターの誤差は5%以内に収まると考えられ、以後のデータ処理に用いた.

ボールが3次元空間を移動し、その重心回りの運動を記述する場合 (ボールの変形は考慮しない), 6自由度の運動を考える必要がある. また、ボール及び渦は3次元的運動 (Seo et al., 2007) であり、その運動が観察されている. しかし、本実験ではホールや渦に関する基礎的な運動を分析するため、側方からの映像より2次元分析を行った. したがって、本研究における慣性座標系は、ボール正面ゴール水平方向を x 座標とし前方を正、その垂直方向を y 座標とし上方を正と定義した (Fig. 5). ボールの x 方向に関する加速度を a_x , y 方向に関する加速度を a_y とし、ボールの飛翔方向に関する迎角を θ とすると、ボールの運動方程式は式(1)と式(2)となる.

$$D = -m((a_y + g) \sin \theta + a_x \cos \theta) \quad (1)$$

$$L = m((a_y + g) \cos \theta - a_x \sin \theta) \quad (2)$$

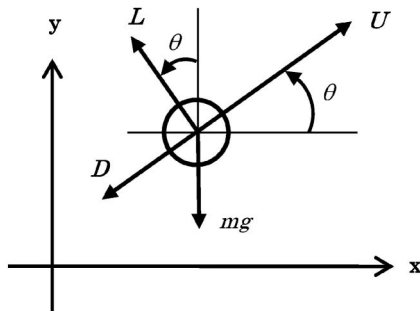


Fig. 5 Definition of aerodynamic forces and the coordinate system used in this study.

ここで、 D は抗力、 L は揚力、 U はボール速度、 m はボール質量、 g は重力加速度を示す.

ボールに働く抗力、及び揚力は、慣性座標系におけるボールの加速度を求めた後、式(1)と式(2)を用いて算出した. また、本実験におけるボールは、飛翔する際、完全に無回転ではなく僅かながら回転が観察された. その回転が揚力に及ぼす影響を考慮するため、ボール表面をデジタル化して回転数を得ることにより、スピンパラメータ (Sp) を求め (式(7)), Carré et al. (2002) らの値を用いてマグナス力 (M) を算出した. そして、揚力からマグナス力を差し引くことにより、そのマグナス力以外の渦による力を渦揚力 (L_V) として求めた (式(8)). 本実験で計測した空気力は、式(3), (4), (5)に示すように抗力係数 (C_D), 揚力係数 (C_L), マグナス力係数 (C_M) として変換した. また、物体の後方に生ずる非定常な渦放出に関する無次元数としてストローハル数 (St) を求めた (式(9)). さらに、得られた揚力は、ほとんどのケースでゆるやかな振動波形を示しており、力のピークから次のピークの時間を計測することにより、低モードの揚力周波数 (f_{LV}) を求めた.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (4)$$

$$CM = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (5)$$

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。

$$Re = Ud/v \quad (6)$$

ここで、レイノルズ数 (Re) は、慣性力と粘性力との比で定義される無次元数であり、 U は流速、 d はボール直径、 v は動粘度又は動粘性係数 (m^2/s) を示す。

$$Sp = \omega R/U \quad (7)$$

ここで、スピンパラメータ (Sp) は、流速と回転速度の比で、 ω は角速度、 R はボール半径、 U は流速を示す。

$$L = M + L_V \quad (8)$$

$$St = nd/U \quad (9)$$

ここで、ストローハル数 (St) は、物体の後方に生じる非定常な渦放出に関する無次元数であり、 n は周波数、 d はボール直径、 U は流速を示す。

2. 非定常渦の可視化

実際に飛翔しているサッカーボール周りの渦流れを可視化し検討するため、発煙物質 (四塩化チタン) をボールに薄く塗布して各試技を行った。

以下は、発煙物質を用いた可視化実験の手順である。

1. サッカーボールに発煙物質をブラシで可能な限り薄く塗る。
 2. サッカーボールを所定の場所に置く。
 3. サッカーゴールに向かってキックする。
 4. サッカーボールがゴールに向かって飛翔し、ボールの周りの流動状況に応じた流れが発煙物質から白煙によって描かれる。
 5. 高速ビデオカメラで撮影する。
 6. ボールを回収してクリーンアップする。
- 可視化によって得られた渦列は、ほとんどの



Fig. 6 Flow visualization of vortex street behind the real flight of the soccer ball (Flow is from left to right).

ケースでゆるやかな振動波形を示していた (Fig. 6). 渦振動周波数は、ボールが計測画面角侵入後 0.4 秒時の静止可視化画像を基に、主流構造 (Streak line) における終末端 (ボール侵入側端) 以外の典型的な渦端の最大座標位置 (極大地点) と最小座標位置 (極小地点) をデジタル化した後、ボール移動速度から求めた。ここで、Streak line とは、ある地点から連続して多数のトレーサーを投入した場合のある時刻にそれぞれのトレーサーが存在する位置を連ねた線を示す。

なお、発煙物質に用いた四塩化チタンは、塩化水素を発生する可能性があるため取り扱いに注意が必要である。

III 結果及び考察

1. ナックルボールの変位、速度、加速度

飛翔レンジの後半におけるナックルボールの変位例 (初速度約 23 m/s) は、緩やかな曲線を示している (Fig. 7-a). ナックルボールの変位は、変化の幅が大きい、比較的典型的と考えられる例を示した。また、インステップキックによるストレートボールの変位例 (初速度約 26 m/s) と比較すると、ナックルボールの方が後半に若干変化が大きいようにみえる。この時の鉛直方向速度を比較すると、ナックルボールの方がストレートボールと比較して、後半に下方方向の速度が大きくなっていることが分かる (Fig. 7-b). そして加速度を比較すると、ナックルボールの加速度はストレートボールの加速度と比較して、重力の影響下であるにもかかわらず、大きく変化 (振動) していることが分かる (Fig. 7-c). この傾向は、他のナックルボールの試技にも同様に観察された。

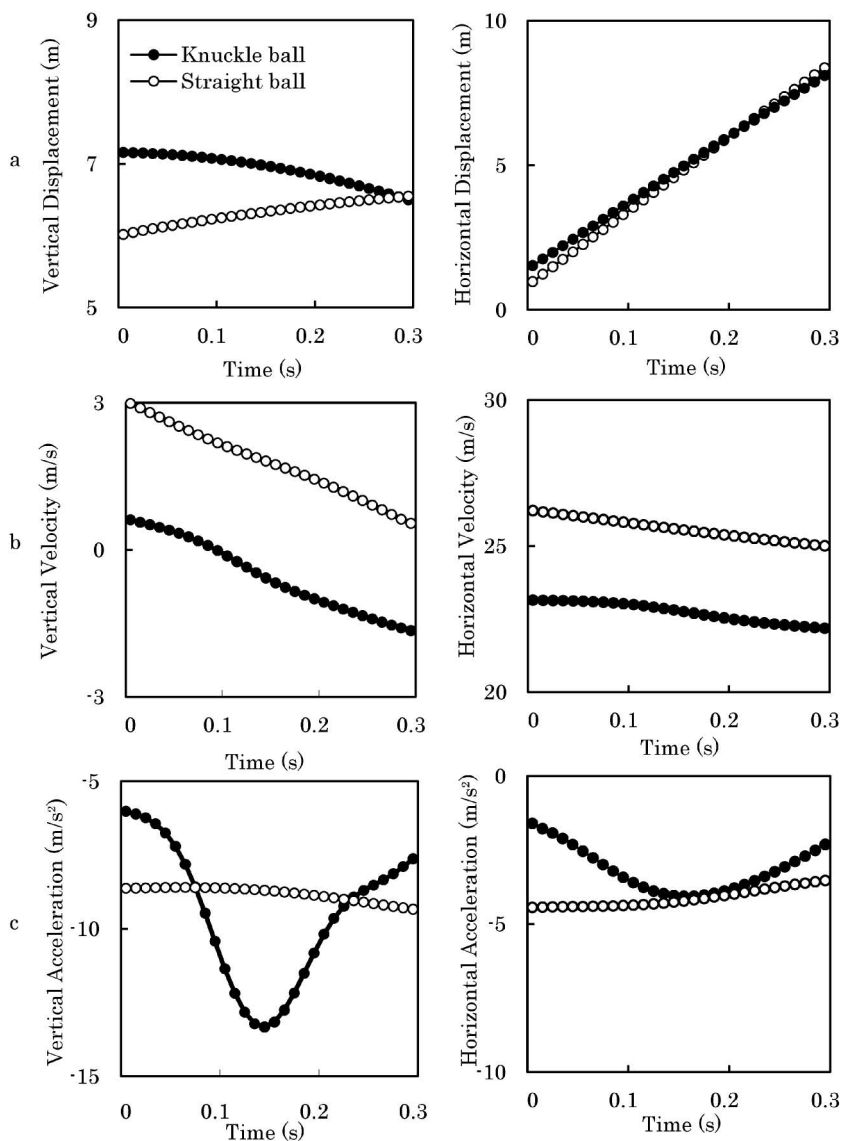


Fig. 7 An example of displacement, velocity and acceleration in a knuckle-ball and a normal straight ball.

この加速度の振動波形は、規則的な調和振動というよりも、不規則な動揺に近い波形と考えられ、極めて非正常性の強い現象であると考えられた。

2. ナックルボールの抗力と揚力

本実験におけるナックルボール例の抗力 (D) と渦揚力 (L_v) をみると、ストレートキック例における抗力と渦揚力に比べ、比較的大きく変動していることが分かる (Fig. 8). 風洞実験にお

ける無回転サッカーボールのレイノルズ数と抗力係数の関係を見ると (Asai et al., 2007), 亜臨界抗力係数は約0.43, 超臨界抗力係数は約0.15を示し, 2006年公式球 (プラスチックガイスト) は約 3.0×10^5 が臨界レイノルズ数 (Re_{crit}) であると報告されている. しかし, これは実験風洞に固定したボールの, ある程度振動する抗力を一定時間平均した値であり, 非正常状態の抗力では異なる特性を示す可能性がある. 本実験における C_D

は約0.16であり、時間変動はあるものの、平均すると風洞実験における超臨界抗力係数の約0.15に近い値であった。

ナックルボール例の渦揚力では、ピーク値が約2 Nとなっており、ストレートボール例における渦揚力ピーク値の約0.5 Nより大きな値を示していた。この揚力は時間に対して大きく変動してお

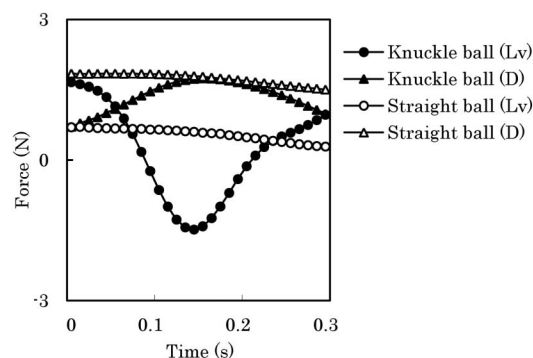


Fig. 8 An example of vortex lift force and drag force acting on a knuckle-ball and a normal straight ball.

り、極めて非定常性の強い現象であると考えられる。この渦揚力は回転によるマグナス力 (M) を揚力 (L) から減じた補正值の揚力 (L_V) であり、ボールの回転以外の要素による力を示していると考えられる。そして、このナックルボールにおける渦揚力の大きな変動傾向は、他の試技にも同様にみられ、渦揚力の平均値は1.84 N (S.D. = 0.46) であった。本実験で計測されたナックルボールの C_L は、非定常揚力の平均値 (1.84 N) から算出 (式(4)) すると約0.18であり、インステップキックのストレートボール例における C_L の約0.04より大きな値を示した (Table 1)。

3. ナックルボールの渦動態

可視化されたボール周り流れにおける境界層の剥離点 (ボール周囲の流れの「境界層」がボール表面から離れる点を剥離点という) は、進行方向に対する上下頂点からやや後方に観察され、Asai et al. (2007) の報告と同様の傾向を示していた。その剥離点直後から連続的に歪んだループ渦が放出されており、ボール直後の渦 (near wake) は、

Table 1 Reynolds number (Re), peak vortex lift force (L_V), spin parameter (Sp), coefficient of Magnus force (C_M), frequency of vortex lift force (f_{LV}) and frequency of vortex street (f_{VS}). (A~J: knuckle-ball, K~L: normal straight ball).

Trial	Re	$L_V(Max)$	C_L	Sp	C_M	$f_{LV}(Hz)$	$f_{VS}(Hz)$
A	3.03×10^5	1.83	0.23	0.034	0.027	4.54	5.55
B	3.03×10^5	1.47	0.19	0.027	0.022	3.84	3.33
C	3.33×10^5	1.44	0.15	0.023	0.018	3.12	3.33
D	3.33×10^5	1.10	0.11	0.026	0.021	3.84	3.84
E	3.48×10^5	2.06	0.20	0.015	0.012	2.50	2.77
F	3.48×10^5	2.26	0.22	0.027	0.021	2.38	2.94
G	3.64×10^5	1.78	0.16	0.037	0.03	4.16	3.57
H	3.79×10^5	1.77	0.14	0.038	0.031	2.77	3.12
I	3.94×10^5	2.26	0.17	0.027	0.022	4.54	5.55
J	4.24×10^5	2.67	0.17	0.016	0.012	3.57	3.12
Mean	3.52×10^5	1.84	0.18	0.027	0.022	3.53	3.76
(S.D.)	(0.38×10^5)	(0.46)	(0.03)	(0.008)	(0.006)	(0.80)	(0.99)
K	3.79×10^5	0.45	0.04	0.069	0.056	1.38	1.25
L	4.24×10^5	0.62	0.04	0.074	0.059	1.25	1.50
Mean	4.01×10^5	0.53	0.04	0.071	0.057	1.31	1.37
(S.D.)	(0.31×10^5)	(0.12)	(0.00)	(0.003)	(0.002)	(0.09)	(0.17)

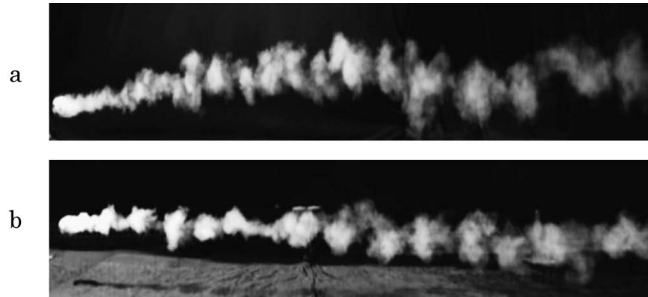


Fig. 9 Comparison of vortex street of a knuckle-ball(a) with that of a normal straight ball(b). A large-scale undulation of vortex street is observed in the case of the knuckle-ball.

すぐさま変形しながら周囲の他の渦と互いに干渉し合体していることが観察された。また、この渦構造はボール飛翔方向に対して上下非対称になっている傾向がみられた。高レイノルズ数における平滑球の渦構造については、風洞実験において馬蹄渦の存在が指摘されており (Taneda, 1978), サッカーボールも同様の渦構造, あるいは歪んだ馬蹄渦構造を示す可能性があると考えられる。しかし、非正常現象の渦構造を3次元的に同定することは極めて困難であり、その詳細な検討は今後の重要な課題の一つである。

本実験の画角全般に及ぶ大規模 (Large scale) 渦構造 (画角進入開始, 約0.4秒後までを含む全体的渦構造 (far wake)) をみると、連続的に放出される渦が変形, 合体し, いくつかの渦塊の形状が連なった渦列構造 (Royer et al., 2009) となっていた (Fig. 9)。風洞実験における平滑球の大規模渦構造は, Re が 2.4×10^4 では交番型の渦構造 (progressive wake motion) を示すが, Re が 6.0×10^5 では, 後流軸方向に偏心した直線の流れ構造を示すと報告されている (Taneda, 1978)。サッカーボールと平滑球の形状の違いはあるが, 本実験におけるナックルボールは, その中間の大規模構造を示していると考えられる。さらに, ナックルボールの遠位渦まで含めた大規模構造の後流軸に対する上下変動をみると, 不規則に振動 (うねり) している形跡が観察される。この大規模構造のうねり (Large scale undulation) は, 渦放出時における渦運動の痕跡を示している

と推測され, この運動の反作用はボールの運動に, 直接影響を与えると考えられる。この大規模構造における渦の振動は, ナックルボール時には顕著に観察されるが, ストレートボール例では小さい傾向がみられた (Fig. 9)。これらのことから, ナックルボール後流の大規模渦構造の振動が, ボールに働く不規則な力を生み出す基礎的メカニズムの一つであると考えられる。

4. 低モードの渦揚力周波数と渦振動周波数

ナックルボールの飛翔軌跡と渦振動の動態を重ね合わせてみると (Fig. 10-a), ボールの飛翔軌跡に上下して放出された渦が振動していることが分かる (Fig. 10-b)。この大規模 (large scale) な振動軌跡とボール軌跡は異なっているが, 渦の振動波形とボールに働いた渦揚力波形は, 逆位相を示す傾向がみられた (Fig. 10-c)。そして, この傾向は他のナックルボールにも同様に観察された。また, 渦揚力周波数と渦振動周波数を比較すると, その周波数が関連している傾向がみられ (Table 1), 統計的にも高い相関 ($r = 0.83$, $p < 0.01$) がみられた (Fig. 11)。以上のことから, ナックルボールに働く不規則な揚力は, 大規模な渦振動が大きな原因の一つになっていると考えられる。

物体の後方に生ずる非正常な渦放出に関する振動特性は, 無次元数であるストローハル数 (St) と関係が深いことが知られている (Achenbach, 1974)。平滑球の St は, Re が 8.0×10^4 の場合,

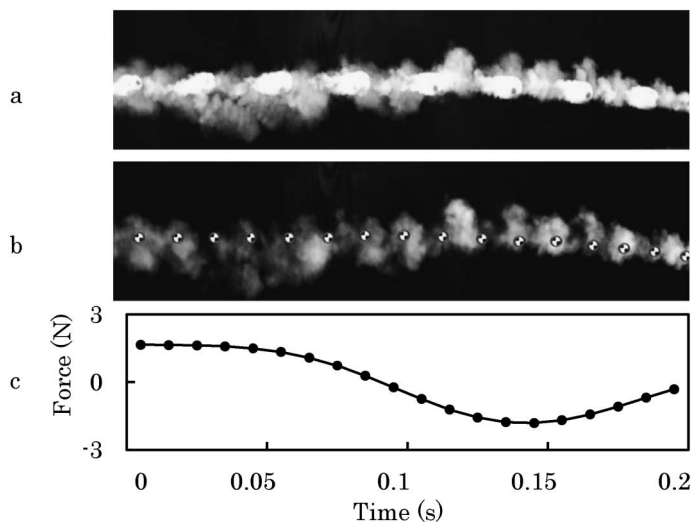


Fig. 10 Relation between large-scale undulation of vortex street (a & b) with vortex lift force (c) in real flight of a soccer ball. Ball trajectory using a stroboscopic technique (a) and a digital technique (b) (Flow is from right to left).

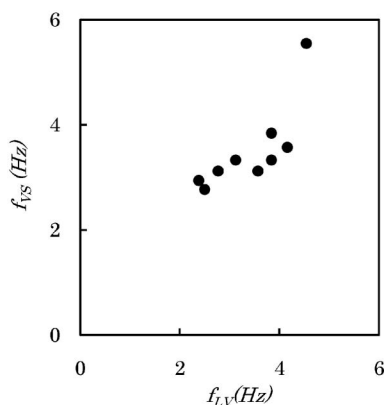


Fig. 11 Correlation between frequency of the vortex force (f_{VL}) and vortex street (f_{VS}).

ハイモードでは約2.0, 同じ Re のローモードでは約0.2とされている (Sakamoto and Haniu, 1995). 本実験で計測された大規模な渦周波数は平均で約3.5 Hzを示し, これを渦周波数モードの一つとみなして換算すると, St は0.03程度となる. この値は, 平滑球のローモード約0.2より, 一桁近く低い値を示しており, 平滑球とサッカーボールの形状の違いはあるものの, サッカーボールには, ハイモードとローモードよりさらに

低い, スーパーローモードとも言うべき St が存在する可能性が考えられる. 本実験で分析した揚力, 及び渦振動の周波数は, 計測方法や映像解像度の関係で, 低周波領域に限定されていた. 大規模な渦構造や周波数について幾つかの知見が得られたが, 渦の3次元構造や比較的小さい渦構造(eddy), 高周波の振動モードに関しては不明な点が多く, 今後の大きな課題である.

IV 要 約

本研究では, 実際にキックされ飛翔するナックルボールに働く流体力やその周波数を, 高速ビデオカメラを用いて分析し, その非定常空力特性について検討した. さらに, 飛翔するナックルボール周りの流体を, 発煙物質(四塩化チタン)を用いて可視化し, その渦動態を分析すると共に, ナックルボールが発現する流体力学的基礎メカニズムについて明らかにしようとした. 結果を以下に要約する.

1) ナックルボールの上下方向加速度はストレートボールの加速度と比較して, 重力の影響下であるにも関わらず, 大きく変化(振動)し

ている傾向がみられた。

- 2) ナックルボール例の渦揚力では、ピーク値が約2.0 N となっており、ストレートボール例における渦揚力ピーク値の約0.5 N より大きな値を示した。この渦揚力は時間に対して大きく変動しており、極めて非定常性の強い現象であると考えられた。
- 3) ナックルボールの大規模渦構造をみると、連続的に放出される歪んだループ渦が変形、合体し、いくつかの渦塊状の形状が連なった渦列構造となっていた。
- 4) ナックルボールの大規模渦構造における後流軸に対する上下変動をみると、不規則に振動(うねり)している形跡が観察された。この大規模構造のうねりは、渦放出時における渦運動の痕跡を示していると推測され、この運動の反作用はボールの運動に、直接影響を与えると考えられた。
- 5) ナックルボールにおける渦揚力周波数は平均で約3.5 Hz を示し、渦振動周波数と比較すると、その周波数が関連しており、高い相関がみられた ($r=0.83$, $p<0.01$)。
- 6) ナックルボール後流の大規模渦構造の振動が、ボールに働く不規則な力を生み出す基礎的メカニズムの一つであると考えられた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、筑波大学大学院人間総合科学研究科の朝岡正雄先生、中山雅雄先生、ならびに韓国ソウル大学の金義洙先生、鄭哲秀先生より多くのご指導・ご助言を賜りました。心よりお礼申し上げます。また、実験に協力していただいた筑波大学蹴球部の選手の方々にも深く感謝申し上げます。

文 献

- Achenbach, E. (1972) Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 54: 565-575.
- Achenbach, E. (1974) Vortex shedding from sphere. *Journal of Fluid Mechanics*, 56: 209-221.

- Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O., and Sakashita, R. (2007) Fundamental aerodynamics of soccer ball. *Sports Engineering*, 10(2): 101-109.
- Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O., and Nunome, H. (2008) A study of knuckle effect in football. *Science and Football VI*, In: Reilly T. and Korkusuz F. (Eds.) *Proceedings of the Sixth World Congress on Science and Football: Antalya, Turkey*, Routledge, London, pp. 64-69.
- Asai, T., Seo, K., Yousuke S., Ito S., Koike S., and Murakami M. (2008) A study of knuckling effect of soccer ball. *The Engineering of Sport 7*, In: Estivalet M. and Brisson P. (Eds.) *The International Sports Engineering Association: Biarritz, France*, 1: 555-562.
- Bearman, P.W. and Harvey, J.K. (1976) Golf ball aerodynamics. *Aeronaut. Quart.*, 27: 112-122.
- Carré, M.J., Asai, T., Akatsuka, T., and Haake, S.J. (2002) The curve kick of a football II: flight through the air. *Sports Engineering*, 5(4): 193-200.
- Carré, M.J., Goodwill, S.R., Haake, S.J., Hanna, R.K., and Wilms, J. (2004) Understanding the aerodynamics of a spinning soccer ball. *The Engineering of Sport 5*, In: Hubbard M., Mehta, R.D. and Pallis, J.M. (Eds.) *The International Sports Engineering Association: Sheffield*, 1: 70-76.
- 久米正夫・高岡大造 (1996) 歪み補正に基づくカメラ校正法の精度評価のための基礎実験. *日本機械学会論文集 C*, 62(598): 179-185.
- Mehta, R.D., Bentley, K., Proudlove, M., and Varty, P. (1983) Factors affecting cricket ball swing. *Nature*, 303: 787-788.
- Mehta, R.D. (1985) Aerodynamics of sports balls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 17: 151-189.
- Rayleigh, L. (1877) On the irregular flight of a tennis ball. *Messenger of Mathematics*, 7: 14-16. Reprinted in *Scientific Papers (Cambridge, UK; 1899)*, 1: 344-346.
- Royer, J.R., Evans, D.J., Oyarte, L., Guo, O., Kapit, E., Mobius, M.E., Waitukaitis, S.R., and Jaeger, H.M. (2009) High-speed tracking of rupture and clustering in freely falling granular streams. *Nature*, 459: 1110-1113.
- Sakamoto, H. and Haniu, H. (1995) The formation mechanics and shedding frequency of vortices from a sphere in uniform shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 287: 151-171.
- Seo, K., Barber, S., Asai, T., Carré, M.J., and

- Kobayashi, O. (2007) The flight trajectory of a non-spinning soccer ball. In: Fuss F.K., Subic A. and Ujihashi S. (Eds.) *The Impact of Technology on Sport II*. Taylor & Francis Group, London, pp. 385–390.
- Taneda, S. (1978) Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . *Journal of Fluid Mechanics*, 85: 187–192.
- Watts, R.G. and Sawyer E. (1975) Aerodynamics of a knuckleball. *Am. J. Phys.*, 43: 960–963.
- Watts, R.G. and Ferrer, R. (1987) The lateral force on a spinning sphere: aerodynamics of a curveball. *Am. J. Phys.*, 55: 40–44.

(平成21年10月2日受付)
(平成22年8月31日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2010/09/17