

美しいサッカーを演出するパワーとスピン

ジョン・エリック・ゴフ

選手の足から放たれたサッカーボールは、ボール表面の粗さとボールに働く非対称な空気力によって、美しくも不思議な軌跡を描く。

ワールドカップの季節——ちょうど1年前、この惑星の人々は、南アフリカ共和国に注目していた。米国で毎年行われるスーパーボール^{*1}のような大きなイベントは、1億人の視聴者の目をくぎづけにする。だが4年ごとに行われるワールドカップの場合、視聴者数はさらに桁違いに多い。ゲームを視聴する人々は、サッカー（ほとんどの国ではフットボールという）のエキサイティングな試合展開のみならず、ボールの運動の物理にも魅了される。

境界層と抗力

プロのゴールキーパーはほとんどの場合、1試合に1, 2ゴールしか許さない。しかし、コーナーキックやフリーキックは得点につながる可能性が比較的高く、興奮する場面である。ファンはオランダ代表のファン・ペルシ (Robin van Persie) のパワフルなシュートに魅了され、またイングランド代表のジェラード (Steven Gerrard) のカー

ブキックに驚嘆する。どちらのキックも物理法則に従っており、物理がボールの飛び方の不思議をひも解く鍵になる。

空中を飛ぶサッカーボールには、ボールの上流側と下流側との間の圧力差による力(圧力抵抗、もしくは形状抵抗という)と、粘性流体[†]である空気とボール表面の相互作用による粘性力(摩擦抗力)が働く。粘性力を理解するには、境界層(流体の粘性の影響が強く及ぶ領域)の概念が本質的である。境界層の概念は、20世紀初頭にプラントル(Ludwig Prandtl)によって導入された。境界層内、つまりボール表面近傍では、ボール表面から離れたとともにボールに対する空気の相対速度が増加する(アンダーソン(John D. Anderson)によるPhysics Today 2005年12月号42ページ[本誌2006年8月号]の記事を参照)。ボール表面では、流体の粘性のため相対速度はゼロであり(粘着条件)、表面からある長さ(境界層厚さ)離れると一様流の速度になる。境界層は、ボールのもっとも上流側(よどみ点)でいちばん薄く、下流側では厚くなる。下流側で境界層がボール表面から完全にはがれると、ボール後流(ボールの背後)に小さな渦を含む複雑な流れ構造になる。サッカーボールの飛び方にみられる不思議の大部分は、どこで境界層がはがれるかに依存する。

流体力学でもっとも重要な無次元量はレイノルズ数 $Re = VD/\nu$ で、 V はボールの重心の空気に対する速度(対気速度)、 D はボールの直径、 ν は動粘度(=粘度/密度)である。物体のまわりを流れる粘性流体にニュートンの第2法則を適用すると、ナビエ-ス

クス方程式[†]が得られる。ナビエ-ストークス方程式は、代表長さ D と時間 D/V で割ることにより、無次元化することができる。無次元化した式は、 Re だけで流体の運動が決まる形となる。工学者が縮尺模型を使って実験を行うときは、 Re を意識する。たとえば直径が半分縮尺のボールを使用して実験するさいには、ボールの幾何形状が同じであるかぎり、流速を2倍にして同じ Re で実験をすれば、力学的に等しい流体現象を再現できる。

ボールが受ける風圧と粘性による相互作用は、抗力を発生させる。抗力の方向は、ボールが飛ぶ軌跡の方向の反対である。抗力の大きさは $F_D = (\rho V^2/2)AC_D$ で、 A はボールの断面積、 C_D は無次元の抗力係数である。抗力係数 C_D は、レイノルズ数 Re とスピン速度(回転速度、もしくは角速度)に依存する。スピンについては次節で議論することにして、ここでは無回転サッカーボールの飛び方を考える。流速が遅い場合、ボールの周囲の流れは層流(整った流れ)になっている。流速が速い場合、流れは乱流(乱れた流れ)で、境界層は層流の場合よりも下流側ではがれる。結果として、乱流はく離の場合 C_D が減少する。

〈図1〉は、3種類のボールにおける C_D の Re 依存性である。急激な C_D の減少(ドラッグクライシスという)は、層流から乱流へ遷移に対応している。表面の粗さは、より小さな Re で流れを層流から乱流へ遷移させる効果がある。たとえば、表面にディンプル(凹み)のあるゴルフボールでは、サッカーボールよりも低い Re でドラッグクライシスが起る。サッカーボールのドラッグクライシスは、滑面球よりも低

瀬尾和哉 訳

Power and spin in the beautiful game

John Eric Goff

John Eric Goff (goff@lynchburg.edu) is an associate professor of physics at Lynchburg College in Lynchburg, Virginia.

Physics Today Vol. 63 No. 7
© 2010 American Institute of Physics

*1 [訳注]アメリカンフットボールのプロリーグの全米王者決定戦のことで、米国最大のスポーツイベント。

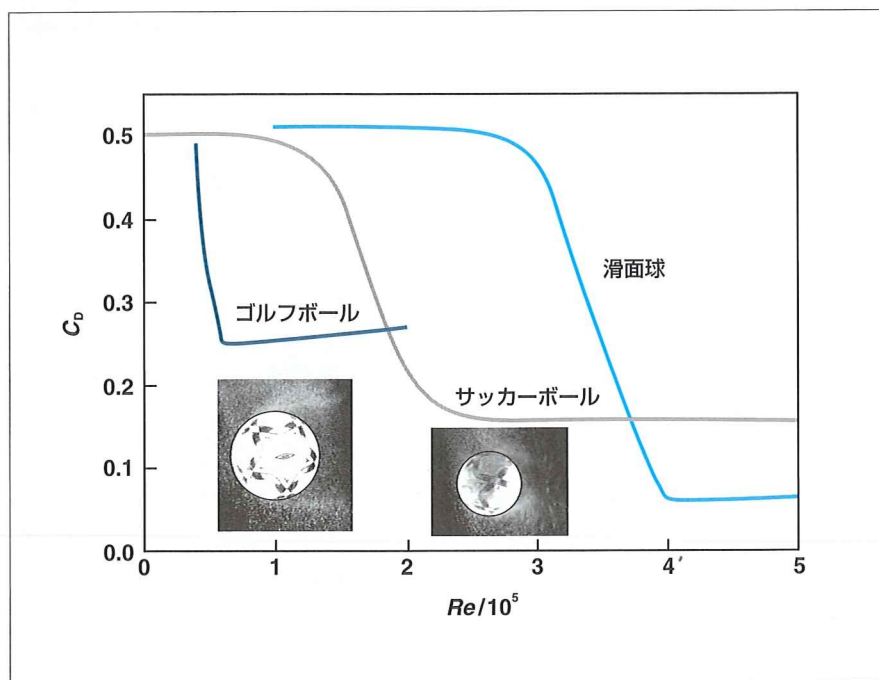
† 「今月のキーワード」(p.54)参照。

い Re で起こる。ディンプルのないゴルフボール(ドラッグクライシス前の亜臨界のため、 C_D が大きい)は、ディンプルのある通常のゴルフボール(ドラッグクライシス後の超臨界のため、 C_D が小さい)ほど飛距離が伸びない。ドラッグクライシスを超えると、サッカーボールの C_D はわずかに増加し、また表面粗さが大きな球の場合はより急激に増加する。野球のボールの場合、 Re が 2×10^5 以下では、 C_D と Re の関係を示す曲線はサッカーボールと似ている(ドラッグクライシス以上の超臨界領域のデータは、ほとんど存在しない)。

サッカーボールの場合、ドラッグクライシスは風速 12 m/s で起こり、その風速は中距離程度のパス速度に相当する。ファン・ペルシのフリーキックは、 $Re = 5 \times 10^5$ で蹴り出され、 $Re = 3 \times 10^5$ でゴールマウスに到達し、その間ずっと Re はドラッグクライシス以上の領域にある。蹴った直後にボールに働く抗力は、ボールの重量より約 15% 大きい。メジャーリーグの投手が投げるストレート(速球)の場合、 $Re = 2 \times 10^5$ で、抗力はボールの重量程度である。ゴルフボールの初速は 70 m/s ($Re = 2 \times 10^5$) で、抗力はボール重量の 2 倍にもなる。高校や大学の教養課程での簡単な力学の講義では、空気抵抗を無視した議論がふつうに行われるが、スポーツにおけるボールの飛び方を考える場合、空気抵抗を無視するわけにはいかない。

偏った空気流をとまう バナナシュート

効果的なフリーキックを蹴るために、ジェラードをはじめサッカー選手たち



〈図1〉ドラッグクライシス

抗力係数 C_D のレイノルズ数 Re 依存性。抗力係数 C_D の急激な減少(ドラッグクライシス)は、層流から乱流への遷移を意味する。この減少は、表面粗さが大きいほど小さなレイノルズ数 Re で出現する。サッカーボールの場合、ドラッグクライシスは $Re = 10^5$ 、ボールの速度 $V = 7 \text{ m/s}$ で起こる。2つの挿入図では、細かい粒子に光を当てて、サッカーボールのまわりの流れを可視化しており、境界層がはく離している様子が見られる。左の図は $Re = 1.1 \times 10^5$ で層流なのに対し、右の図は $Re = 2.7 \times 10^5$ で乱流となっている。右の図では、境界層のはく離がより下流側で起こっている。うまく蹴り出されたフリーキックでは、レイノルズ数はつねに乱流領域にある。

は、ボールの蹴り出し速度を大きくしたいと思っている。そうすれば、ゴルフキーパーがボールに反応するための時間がより短くなる。その一方で、ボールには速いスピンのも与えたい。ボールの軌跡を大きくカーブさせるためだ。しかし、速度とスピンは二律背反(トレードオフ)の関係にある。ボールに大きな並進速度を与えるためには、ボールの重心を正確に蹴らなければならないが、速いスピンを与えるためには、ボール重心から外れた位置を蹴る必要があるのだ。ジェラードが直接ゴールを決めたフリーキックの場

合、初期のサイドスピンは 600 rpm (回転/分)程度である。ほかの競技と比較すると、メジャーリーグの投手が投げるカーブの場合、サイドスピンは 2000 rpm 、ゴルフボールがティーから飛び出した直後のバックスピンは 2500 rpm 以上(ゴルフクラブのヘッドの傾きやフェイスの溝のおかげ)である。

角速度 ω でスピンするボールは、ボールの背後の空気流(ボールを通過した空気流)を偏らせる。〈図2〉のボールと空気流の概念図には、スピンキックの重要な特徴が描かれている。ボー

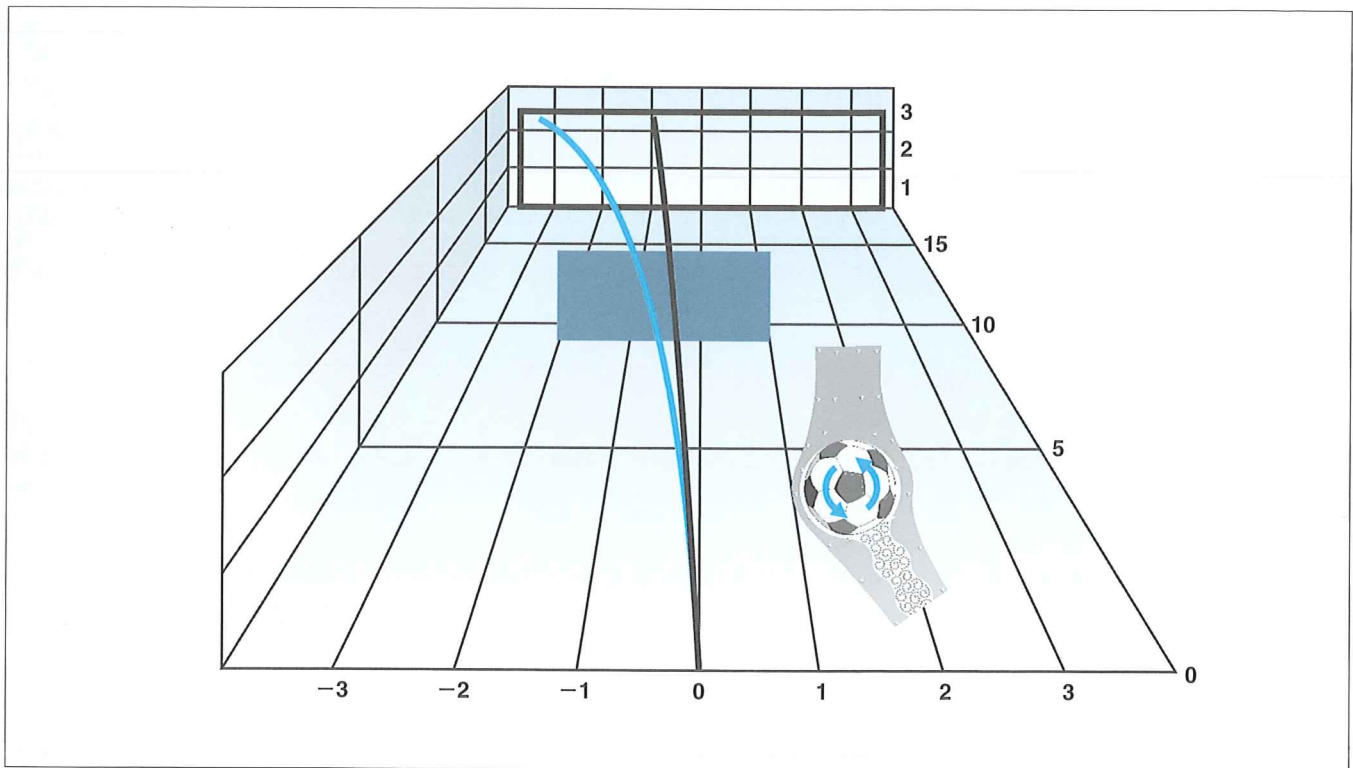
*2 [訳注] 流体中で回転する球にはマグヌス力がはたらく。回転による速度の非対称性が圧縮差を生み出し、マグヌス力となる。1852年、ドイツの物理学者マグヌスが発見したことからこの名がある。

ルの左右で境界層のはがれる位置が異なっており、ボールの進行方向と回転方向が反対向きになる側、つまり左側では、境界層のはく離がより下流側で起こる。この非対称性により、空気はボールに横方向の力を与える。この力はマグヌス(Heinrich Gustav Magnus)にちなんでマグヌス力^{*2}をよばれており、その方向は $\omega \times V$ の方向、つまり角速度ベクトルと速度ベクトルに垂直な方向である。これに似た現象は海でも起こる。ボートの舵がボートを通過する水流を非対称に曲げると、その反作用でボートが曲がる。マグヌス力は、抗力とともに作用す

る。もちろん、空気力はある1方向の力としてボールに働くが、その力をどのような軸方向成分に分割するかは、科学者次第だ。

〈図2〉のボールの軌跡は、ジェラードの蹴るようなバナナシュートを示したもので、利き足が右のジェラードが20mのフリーキックを蹴った場面のシミュレーションである。守備側の選手たちが並んでつくった壁(青の長方形で示している)は、バナナシュートに備え、ジェラードから見て左側に偏っている。またゴールキーパーは、ジェラードから見て右側を意識して守っている。ジェラードの狙いはゴール

ルマウスの左上角である。すばやいゴールキーパーは無回転で蹴りだされたボールをしばしば止める。しかし、ジェラードの蹴るバナナシュートを止めることはとても難しい。彼のバナナシュートは、図に示されているようにカーブするだけでなく、いくらか落ちてくる。フリーキックを蹴った直後のマグヌス力は、ボールの重量と同程度である。ゴルフボールの場合も、ティーから打ち出された直後のマグヌス力はボールの重量と同程度である。野球のカーブの場合、投手の手を離れた直後のマグヌス力は若干小さく、ボール重量の25%程度である。



〈図2〉ゴ——ール！

サッカー選手がフリーキックを得ると、相手チームの選手たちは並んで青の長方形で示すような壁をつくる。この図では、壁を超える2種類のフリーキックの軌跡を示した。黒線はサイドスピンなしの場合、水色の線はゴールキーパーがとりづらいサイドスピンありの場合である。図中の数値は距離(単位はm)である。挿入図はライト(Kenneth Wright)の好意によるもので、ボールを上から見た概念図である。ボール通過後の気流は右に偏っている。よって、ニュートンの第3法則(作用反作用の法則)より、空気はボールに左向き力を与える。

競技用のボールの空気力学を研究するために、研究者たちは風洞実験や洗練された数値流体力学プログラム、計算機による軌跡の解析などを利用する。私たちは、おなじみの五角形と六角形を組み合わせたパターンの32枚の薄片を縫い合わせてできたサッカーボールと、2006年のワールドカップで使用された、14枚の薄片を熱接合しているアディダス社のボール、“チームガイスト”の実験をした。私たちの実験では、広い範囲のレイノルズ数に

わたって C_D に大きな違いはみられなかったが、“チームガイスト”に働くマグナス力は、従来のボールよりも少し大きかった。昨年のワールドカップでは、アディダス社のボール“ジャブラニ”(8枚の薄片が熱接合されていて、表面には溝がある)が使われた。これらの回転するボールの陰には多くの物理が潜んでおり、その軌跡に歓喜する国もあれば、一方で悲嘆にくれる国もあるのだ。

参考文献

- 1) J. E. Goff: *Gold Medal Physics, The science of Sport*, Johns Hopkins U. Press, Baltimore, MD (2010).
- 2) J. Wesson: *The Science of Soccer*, IOP, Bristol, UK (2002).
- 3) J. E. Goff, M. J. Carré: *Eur. J. Phys.* **31**, 775 (2010).
- 4) J. E. Goff, M. J. Carré: *Am. J. Phys.* **77**, 1020 (2009).
- 5) B. G. Cook, J. E. Goff: *Eur. J. Phys.* **27**, 865 (2006).

世界天文年公認書籍

MARUZEN

ビジュアル天文学 [全3冊]

見えない宇宙を観る —天体の素顔に迫るサイエンス—

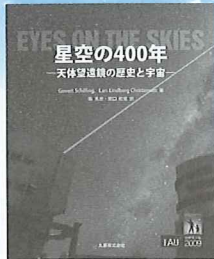
Lars Lindberg Christensen,
Robert Fosbury,
Robert L. Hurt 著
岡村 定矩 東京大学大学院理学系研究科教授 訳
A4変・152頁
定価4,095円(本体3,900円)
ISBN978-4-621-08144-0



電波天文学の確立によって、これまで私たちの肉眼では見ることのできなかった本当の宇宙の姿を、最新の画像とともに紹介。

星空の400年 —天体望遠鏡の歴史と宇宙—

Govert Schilling,
Lars Lindberg Christensen 著
縣 秀彦 国立天文台准教授・普及室長
関口和寛 国立天文台教授・国際連携室長 訳
A4変・136頁
定価3,990円(本体3,800円)
ISBN978-4-621-08145-7

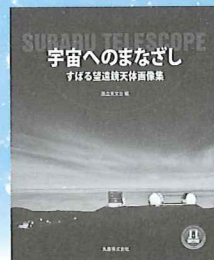


ガリレオの時代から現在までの天体観測技術の進歩と、天文学の未来への挑戦を、最新のカラー天体画像をふんだんに用いて解説。

宇宙へのまなざし —すばる望遠鏡天体画像集—

国立天文台 編
A4変・128頁
定価2,940円(本体2,800円)
ISBN978-4-621-08174-7

「すばる望遠鏡」10周年記念写真集。1999年、ハワイ島マウナケア山頂で、世界最大級となる口径8.2メートルの光学赤外線望遠鏡を備えたすばるは、宇宙からの光をとらえ始めた。本書は、これまですばる望遠鏡が写し出した天体画像のなかから、選りすぐり約70点を一挙収録。



丸善出版株式会社 〒140-0002 東京都品川区東品川4-13-14 グラスキューブ品川 営業部 TEL(03)6367-6038 FAX(03)6367-6158
<http://pub.maruzen.co.jp/>