

# 進化するサッカーボール

播磨尚朝\* (hh@kobe-u.ac.jp)

私は固体電子論を専門として長年研究を続けてきた。2年前に大学を定年で退職した後も、いろいろな方にお世話になりながら研究を続けている。

電子状態計算には、結晶の対称性の知見は欠かせない。結晶を構成する原子配置が回転や並進などの変換操作で不変であれば、その変換操作を対称操作と呼び、そのような性質を対称性という。

結晶内の電子状態の対称性は結晶の有する対称性と同じかそれよりも低く、物理現象の対称性は電子状態の有する対称性と同じかそれよりも高い、と考えられる。中でも、反転対称性の破れは電気磁気の相関現象と深い関わりがある。

## 1. はじめに

今年は4年に一度のサッカーワールドカップの年である。巷では失われた30年などと言われているが、この30年で日本のサッカーは強くなった。1993年にプロ化された後に1998年のフランス大会以降は毎回ワールドカップに出場しているが、2002年に日韓大会として日本で開催されたことも普及にも大きな効果があった。

さて、年配の皆さんにとって、サッカーボールと言えば黒い正五角形と白い正六角形のパネル(革)を張り合わせたボール(切頂20面体)であろう。このパネルの交点に炭素原子を配した分子はフラーレンとしても知られていて、その発見に対して1996年のノーベル化学賞が贈られている。2002年のサッカーワールドカップ日韓大会の公式球はFevernovaと呼ばれる色鮮やかなデザインであったが、パネルは従来の32枚を用いた切頂20面体であった。

ところが、2006年のドイツ大会から公式球を形作るパネルの構成が変わったことをご存知でしょうか。しかも、その後は4年に1回のワールドカップ毎に変わっている。図1は、これらの公式球やそのレプリカ球などである。これらのサッカーボールを持って高校を訪れ、机の上に置いておくと、「これなんですか!」と高校生が集まってくる。そこで「これらのサッカーボールを2種類に分けなさい」と言うと、高校生たちはいろいろと考えだす。大きさだったり、パネルの境界が直線か否かだったり、である。

## 2. ボールの対称性

そこで、ボールを手にとって、回転操作や鏡映操作などの対称操作について少し教えると、ボールをくるくると回し始める。ボールは表1にあるように、4回回転対称性の



図1 これまでのサッカーワールドカップ公式球など。大きいボールは5号球、小さいボールは2号球。

有無や反転対称性の有無などで分類できることが分かる。高校生の様子を見ていると、回転対称性を理解するのは難しくないのである。鏡映対称性もそれほど難しくはない。空間反転や回映(回転と鏡映の組み合わせ)は、簡単には理解できない。空間反転対称操作を理解するのは、その対称性の表現(ボール)が目前にあっても、簡単ではない。

そこで、掌(てのひら)を上にして両手を前に出し、その間に鏡があると考える。これが鏡映である。次に、その鏡映面に垂直な軸を考え、その軸のまわりに片方の掌を180度回転させる。鏡映(面対称)と180度回転(軸対称)を組み合わせると、結果として一点を中心とした対称操作になる。これが空間反転、すなわち点対称である。しかし、この二段階の操作を頭の中で重ね合わせるのとは容易ではなく、生徒たちは首をひねる。さらに、もとの鏡映面に平行に掌を動かすと、中心となる点も動くが、両掌が空間反転の関係であることに変わりがないところまで理解するように促す。

## 3. サッカーボールの進化

サッカーボールは、蹴りやすいように、あるいは蹴った時に思ったところに飛ぶように、作られていると思われる。その中で、20年の間に立方晶系の6種類のボールが登場している。表1を見てもらえば分かるが、2006年以降の点群

\* 神戸大学名誉教授

表1 これまでのサッカーワールドカップ公式球の歩み. 位数は対称操作の数のことである.

開催年	開催地	公式球名	パネルの数	パネルの境界	4回回転 /4回反	鏡映	空間反転	点群 (位数)
1970	メキシコ	TELSTAR	12 + 20	直線	×	○	○	$I_h$ (120)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2006	ドイツ	+Teamegeist™	6 + (4 + 4)	曲線/直線	×	○	○	$T_h$ (24)
2010	南アフリカ	JABULANI	4 + 4(1 + 3)	曲線	○	○	×	$T_d$ (24)
2014	ブラジル	Brazuca	6	曲線	○	×	×	$O$ (24)
2018	ロシア	TELSTAR 18	6	直線	○	×	×	$O$ (24)
2022	カタール	Al Rihla	12 + 8	直線	×	○	○	$T_h$ (24)
2026	北米3カ国	TRIONDA	4	曲線	×	×	×	$T$ (12)

※2006年の+Teamegeist™のパネルの(4+4)は同じ形で鏡像体の4枚づつを意味している. 2010年のJABULANIのパネルは公式には4+4とされているが, 片方の4枚のパネルは(1+3)で構成されているように見える.

はすべて立方晶系, あるいは等軸晶系と呼ばれる結晶点群タイプである. つまり, これらのボールは3回対称軸が4つあり, 等方的である.

平面のパネルを使って球に近い形を作ろうとすると, なるべく小さなパネルをたくさん使うのがよさそうに思える. 一方で, パネルの境界を縫わなければいけないので, それは少なくした方がよいに違いない. ただし, 今はパネルの境界を繋ぐのは, 糸を使わない圧着方式に変わっているので, 境界線が長くても問題は少ないのかもしれない. 表1を見て分かるように, この20年間の間にいろいろな対称性やパネル数のボールが作られている. 興味深いのは, 2010年のJABURANIは, 選手にはあまり評判がよくなかったということだ, 本田佳祐の揺れるシュートがあった大会である.

#### 4. 結晶の対称性とノイマンの原理

ノイマンの原理 (Neumann's Principle) として「結晶あるいは物質の物理的性質は, 少なくとも, その結晶の点群の対称性をもたなければならない」ということが知られている.<sup>1)</sup> これは, 自然現象を理解するには対称性を考慮することが欠かせないことを教えている. 当然ながら, いろいろな対称性のボールはさらに高い対称性の球の性質が現れることを期待して作られているのであろう. これまでのボールの空力特性については, 筑波大学の浅井武先生などがよく研究されている.<sup>2)</sup> 風洞実験などによって行われている性能評価ではボールの回転による効果も詳細に調べられている.<sup>3)</sup> しかし, ボールを蹴った時に生じるボールの固有振動に関する視点は無いようである.

いずれにせよ, ボールの変遷がよりよいボールへの進化であるとして, それを対称性の観点から見ると, 2006年から2022年までは対称操作の数(位数)は減らなかつた.

つまり, 対称性が低くなることは無かつた. 表1から読み取れることは, 鏡映対称性がなくなり, パネルの数が少なくなる傾向があつたが, 2022年には逆戻りしたように見えた. つまり, 行き詰まったかのように見えた.

ところがである. 2026年のTRIONDAの対称性は新しい. 対称操作の数も, 2006年以来の24に比べて半分の12であり, パネルの数も4枚しかない. このボールは3回対称性の4つのパネルから成っているが, 立方晶系の範囲ではこれ以上はパネルの数は減らせないように思われる. 私は, 2014年に位数が24の立方晶系点群が出尽くした時に, 「2018年サッカーワールドカップ・ロシア大会の公式球は点群 $T$ に属しパネルの枚数は4枚——これが究極のサッカーボールとなる」と予言した.<sup>4)</sup> 8年遅れたがついに $T$ が現れた!

#### 5. おわりに

初学者には「対称性」というものは馴染みがない. 高校生などに対称性の違いやその意味に気付いてもらうには, これらのサッカーボールは格好の材料ではないだろうか. 今回のワールドカップでは, 是非とも日本代表に躍進してもらって, 対称性に興味を持つ若者が少しでも増えてくれることを願っている.

#### 参考文献

- 1) G. バーンズ著, 中村輝太郎, 澤田昭勝共訳, 『物性物理学のための群論入門』(培風館, 1983).
- 2) つくばサイエンスニュース, 「007. パリ 2024 大会 サッカー競技の公式試合球の性能とは? (筑波大学名誉教授 浅井 武さん)」, <https://www.tsukuba-sci.com/?column03=007-パリ2024大会-サッカー競技の公式試合球の性能とは> (2026年2月6日確認).
- 3) 浅井 武, 瀬尾和哉, 小林 修, 体育学研究 52, 29 (2007).
- 4) 播磨尚朝, 固体物理 49, 505 (2014).

(2026年2月6日原稿受付)