

複雑な攻守のゆらぎに潜む単純な法則

—サッカーの試合展開をフラクタル理論で解明—

●山梨大学の木島章文 准教授・島 弘幸 准教授、北海道大学の横山慶子 博士研究員、名古屋大学の山本裕二 教授らの研究グループは、**プロサッカーチームの試合展開を科学的に解析し、目まぐるしく変わる攻守の切り替わりが、ある単純な物理法則で説明できる**ことを初めて実証しました。同グループは、複数のプロサッカーチームの試合経過をビデオカメラで記録し、全試合時間にわたってコート上を縦横無尽に動く選手とボールの軌跡をコンピュータ上で解析しました。ボール位置の時間変化とチーム前線位置の時間変化を、それぞれ時系列グラフに表した結果、それらのグラフ曲線には「**フラクタル**」^(注1)と**称される不思議な自己相似パターンが現れる**ことを突き止めました。

●フラクタルという構造は、樹木や血管の枝分かれ・海岸線・株価チャートなど、自然界や社会現象に数多く見つけることができます。そうした自然の普遍則が、サッカーのような集団球技にも見つかることが、今回の研究で初めて明らかとなりました。今回用いた研究手法はサッカーの解析に限らず、多数の人間が織りなす社会現象や、動物の集団行動の理解にも広く役立ちます。さらに今回開発した集団運動に対する数理モデルを拡張することで、緊急時・危険発生時における群衆行動の制御や、避難経路の設計にも役立つと期待されます。

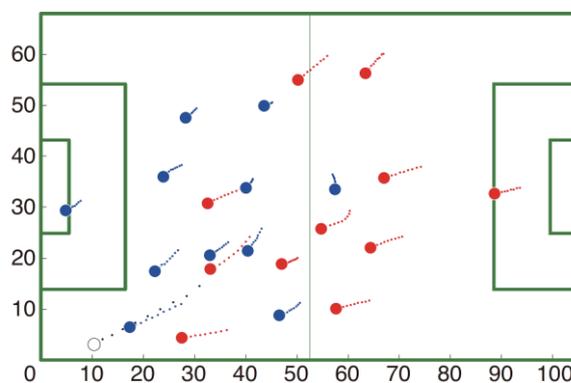
●本研究成果は、EDP Sciences 社が発行する物理学専門誌 *European Physical Journal B* (ヨーロピアン フィジカル ジャーナル B) にオンライン掲載 (2月19日) されました。さらに同雑誌の公式 web 上にて、「注目度の高い最新論文」としてトップページに紹介されました。

【背景】

スポーツ科学の分野では、集団で行う球技を研究する場合、次のいずれか二つの方法をとることがほとんどです。一つは、ゲーム全体の流れの中から部分的なシーンだけを切り抜き、選手の動きを心理学的・行動学的に捉える研究。二つ目は、ゲームスコアや対戦履歴に関する確率論的な研究です。この二つはいずれも「試合に勝つ」ことを目的とした研究であり、実学的な色合いが強いと言えます。

山梨大学・木島准教授らが今回発表した論文は、上の二つとは全く異なる視点から、プロサッカー競技の動態を調べました。木島らがとった手法は、試合全体にわたる選手とボールの動きを、一般の自然現象・物理現象と同じ観点で捉えるというものです。試合時間全体を通してコート上を目まぐるしく移動する全選手とボールの位置を自らの手で録画し、その解析データから「**サッカーの試合展開を支配する単純な法則性**」を初めて見出しました。

集団球技の試合展開は、選手個々の意思・技量に強く依存する普遍性のない現象と思われがちです。しかし今回の成果は、チーム全体の動きとボールの動きの両方が、ある普遍的な法則に従うことを示唆しています。常識的な直観とは相反する興味深い研究結果であり、スポーツ科学・複雑系科学の両分野に対して、高いインパクトを与える成果と言えます。



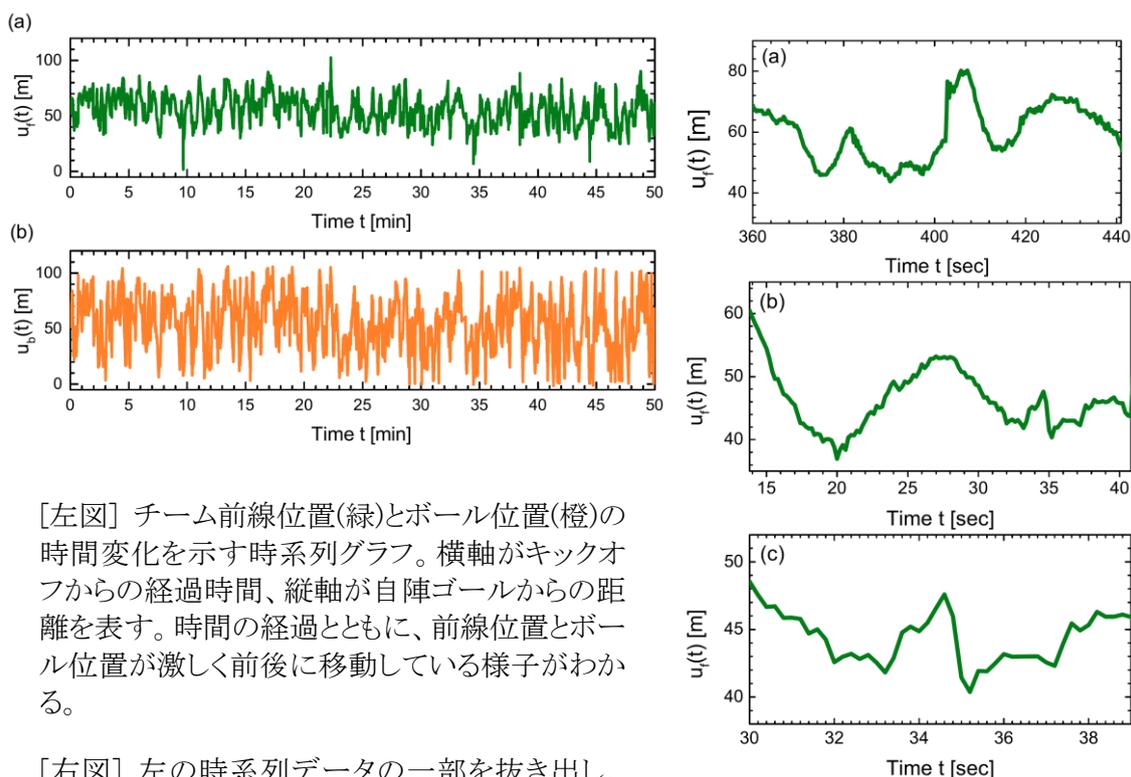
[左図] サッカーゲームの記録映像の一部。実際の研究では、複数のプロサッカー試合を映像に記録した後、全選手の位置とボール位置の時間変化をコンピュータ上で解析した。

[右上図] 選手とボールの動きを表す再現図。両チームの選手を赤と青で色分けし、全試合時間にわたる個々の選手とボールの動態を解析した。

【研究の成果】

現実のサッカーの試合では、両チーム合わせて 22 名の選手が、お互いに相反する目的達成のために複雑な動きを繰り返します。一瞬一瞬におけるボールや選手の動きは、個々の選手の勝手な意思に依存します。そのため、個の動きの蓄積であるチーム全体の動きには、何の法則性・普遍性も存在しないと「一見」感じられます。

木島らの成果によりますと、上述の予想に反して、サッカーの試合展開には単純な法則が存在します。それは、全試合時間にわたるボール位置の時間変化と、チーム前線位置の時間変化に関する法則です。これら二つの位置変化を時系列グラフに表すと、そこには「**フラクタル**」^(注1)と称される不思議な自己相似パターンが現れます。フラクタルとは、その図形(または曲線)の一部と図形(曲線)全体が、互いに相似な性質を指す用語です。フラクタル性をもつ構造は自然界や社会現象に数多く見つけることができます。そうした自然の普遍則が、サッカーのような集団球技にも見つかることが、今回の研究で初めて明らかとなりました。



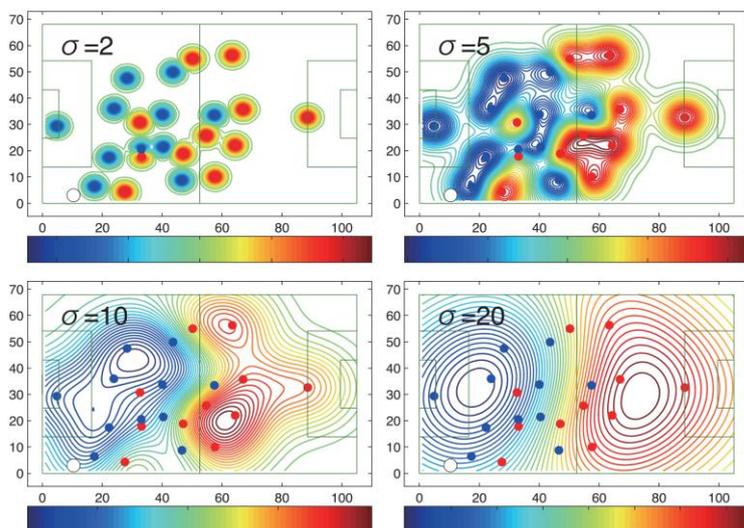
[左図] チーム前線位置(緑)とボール位置(橙)の時間変化を示す時系列グラフ。横軸がキックオフからの経過時間、縦軸が自陣ゴールからの距離を表す。時間の経過とともに、前線位置とボール位置が激しく前後に移動している様子がわかる。

[右図] 左の時系列データの一部を抜き出し、縦横の縮尺をそれぞれ3倍・9倍に拡大したグラフ曲線。縮尺を変えても、似たような曲線が繰り返し現れる。こうした性質をフラクタルと呼ぶ。

ボールやチーム前線の時系列変化がフラクタル性を示すという事実は、それらの動きが「記憶」と「忘却」に支配されていることを意味します。すなわちサッカーの試合展開においては、ある瞬間の動き(ボール or チーム前線)が、それより未来の動きに強く影響します。どれだけ遠くの未来にまで影響を与えるか、その最長の時間を**持続時間(persistency time)**と呼びます。木島らの解析結果によると、プロのサッカーチームの試合では、この持続時間はおよそ 30 秒に満たないことが判明しました。これまでも、ボールや選手の動きに時間的な繋がりがあことは経験的にわかっていましたが、数値解析をもとに 30 秒という具体的な持続時間の上限値を算出した例は今回が初めてです。ちなみにこの数字は、2002 年ワールドカップの全試合を分析した先行研究ともよく一致しています。

【研究の方法】

本研究で試合データを取得する際には、試合の一部だけを切り取ることはせず、全試合時間にわたるボールと選手の動態を把握するよう留意しました。具体的に扱った試合は、2008 年の FIFA クラブワールドカップの準々決勝と、2011 年日本プロサッカーリーグ (Jリーグ) の試合です。この 2 試合における選手全員の位置とボールの位置をデジタルカメラで録画し、取得データをコンピュータ上で再現しました。そのデータを数値解析することで、ボール位置とチーム前線位置に関する時系列グラフを作成しました。



[図] 各チームの支配領域の解析過程。個々の選手が自分の周囲に一定の支配領域を張り巡らすと仮定し、個々の支配領域を各チームで積算することで、チーム全体の支配域と前線位置を算出した。

【今後の展開】

本成果を踏まえた次の課題は、なぜサッカーの動きがフラクタル性を示すのか、その科学的理由を解明することです。フラクタル性の起源を知るには、選手個々のプレーが互いにどのような影響を及ぼし合っているのか、選手間の相互作用を記述する数理モデルを新たに構築する必要があります。同様の指針は、サッカーに限らず、バスケットボール・ハンドボール・ホッケーなど様々な集団球技にも当てはまります。サッカーとは異なる球技に対しても本研究と同じ解析を行い、時系列データに現れる類似点と相違点を調べることで、個々のスポーツ種目の試合展開を特徴づける新たな数値指標を提示できる可能性があります。

【成果の意義と応用可能性】

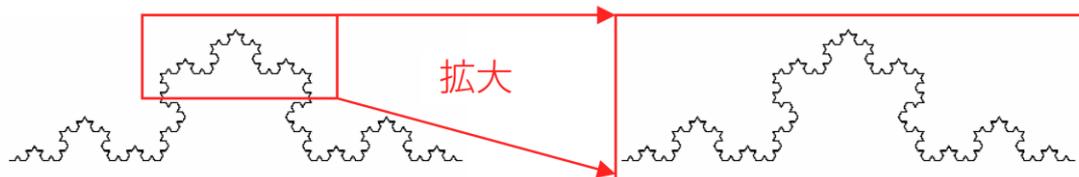
今回得られたスポーツ科学に関する成果は、「複雑系科学」という、より広い視座からみても重要な意義を持ちます。複雑系科学の観点からみた今回の成果の意義は、

- ・直前のプレーの記憶が、次の瞬間のプレーに強く影響する。
- ・その一方で、試合時間全体を見渡すと、個々の記憶は次々と忘却され、新たな記憶に上書きされ続ける。

という事実を明らかにした点です。こうした記憶と忘却の反復は、サッカーに限らず、人間の社会現象や動物の集団行動 全般によく当てはまります。その意味で今回の研究成果は、ヒトや動物の複雑な集団行動を理解するための一手段を提供するといえます。さらに、集団行動における人間同士の相互作用を数理モデル化することができれば、緊急時・危険発生時における群衆行動の制御や避難経路の設計にも役立つと期待できます。

【用語説明】

(注 1)フラクタル：図形の一部を切り出して拡大したときに、もとの図形と同じ形をとる時、その図形をフラクタルと呼ぶ。同じ意味で、自己相似(self-similar)な形と呼ぶことも多い。自然界には、雲の形や樹木の枝・リアス式海岸など、フラクタルな構造が多数あることが確認されている。



コッホ曲線（代表的なフラクタル図形）

【論文発表】

タイトル: Emergence of self-similarity in football dynamics

著者名: Akifumi Kijima, Keiko Yokoyama, Hiroyuki Shima, Yuji Yamamoto

掲載雑誌: European Physical Journal B

掲載巻・ページ等: Vol. 87, No. 2 (February 2014) Article Number 41

掲載年月日: 2014年2月19日オンライン掲載

URL: <http://epjb.epj.org/>

DOI: 10.1140/epjb/e2014-40987-5

【研究助成】

科学研究費補助金 (課題番号: 22650146, 23500711, 24240085, 25390147)