

人のネットワークの定量化と内的・外的要因の相互影響分析: サッカーチームを例に



広瀬 統一 (Norikazu Hirose, Ph. D.)

早稲田大学 スポーツ科学学術院 教授
(Professor, Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

日本アスレティックトレーニング学会、日本臨床スポーツ医学会 他
受賞:

日本サッカー協会 100 周年特別功労表彰 (2021 年)

日本アスレティックトレーニング学会 優秀実践報告賞 (2023 年)

著書:

スポーツ科学概論 (監修)、文光堂 (2024 年)

サッカーのパワートレーニング (競技力が上がる体づくり)、ベースボール
マガジン社、(2022 年)

アスレティックトレーニング学 (監修)、文光堂 (2019 年) 他

研究専門分野: アスレティックトレーニング学、身体協調性

あらまし

本研究は、スポーツ場面における人と人との協調行動を、三軸加速度データと有向ネットワーク分析により定量化し、その形成要因や課題達成への影響を明らかにすることを目的とした。サッカーを対象に、プロチームと大学チームの試合データを収集し、二者関係 (Dyad) や三者関係 (Triad) の頻度、多様性 (ネットワークを構成する人の入れ替わり)、ならびに能動性と受動性の比率を示す Interaction Dynamics Network (IDN) 指数を算出した。その結果、プロチームは大学チームよりも複雑な協調構造を示す一方、試合後半には両チームで多様性が低下し、とくにプロチームで顕著であった。また、ポジション別には MF が能動的な関与を多く示し、DF や FW は受動的関与が多いことが明らかになった。さらに、外傷後に競技復帰した選手では IDN 指数が低下し、能動的な協調が減少していた。

これらの知見は、競技復帰支援や戦術的柔軟性の評価に資するとともに、教育・福祉・産業領域におけるソーシャルキャピタルの定量的評価と改善にも応用可能であると考えている。

1. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、人の協調的行動を資本とする「ソーシャルキャピタル」を支える評価・改善のサイクルを構築することである。そのための第一歩として、スポーツ場面における協調状態 (ネットワーク) の定量化手法を確立し、その形成に影響を及ぼす内的要因 (競技レベル等) および外的要因 (前後半など) を明らかにすることを目的とする。加えて、内的要因としてケガによる選手の離脱と復帰がチーム内のつながりに及ぼす変化を分析する。

これらを通じて、加速度センサを用いた客観的・再現可能な指標に基づき、人の協調行動の特性を可視化することで、競技スポーツのみならず、教育・福祉・職域におけるソーシャルキャピタルの醸成に資する応用可能性を探る。

2. 研究の背景

近年、チームスポーツの研究においては、個人の運動能力のみならず、試合中の選手間のつながり (ネットワーク) がパフォーマンスに大きく影響することが報告されている。従来の競技復帰指標は、フィジカル面の回復や心理的な運動恐怖感の低減に焦点が当てられてきた。しかし、能動的に周囲をリードするネットワークの割合が減少し、反応的に従属するネットワークが増加する能動的なネットワークの低下は、チーム全体のパフォーマンス低下や再受傷リスク増加と関連する可能性がある。にもかかわらず、このような「つながりの質」に着目した評価は十分に行われていない。一方で、従来の試合分析は主として「ボール保持者と関わる選手」の関係に限定されてきた。だが実際には、ボールに直接関与していない選手の動きも試合全体の協調状態に大きな影響を与えている。これを包括的に分析するためには、位置情報や加速度データをもとにした新たなアプローチが求められる。近年、田中ら (2021) によって、加速度データに基づ

人のネットワークの定量化と内的・外的要因の相互影響分析: サッカーチームを例に

き二者 (Dyad) や三者 (Triad) の同期性を定量化する有向ネットワーク分析手法の有用性が提唱されている。申請者らは、同手法を活用し、サッカーの試合中のネットワークの可視化と、ネットワークに影響する内的、外的要因を検討することを目的とした。これらの成果は、競技場面に限らず「ひとのつながり」を定量化する可能性を示している。ソーシャルキャピタル研究に

においても、人的ネットワークを可視化し、評価・改善の指標とする試みは重要である。しかし、運動データをもとにしたネットワーク定量化は世界的にも稀であり、その内外要因との相互作用や課題達成への影響は未解明の領域である。

3. 研究の方法

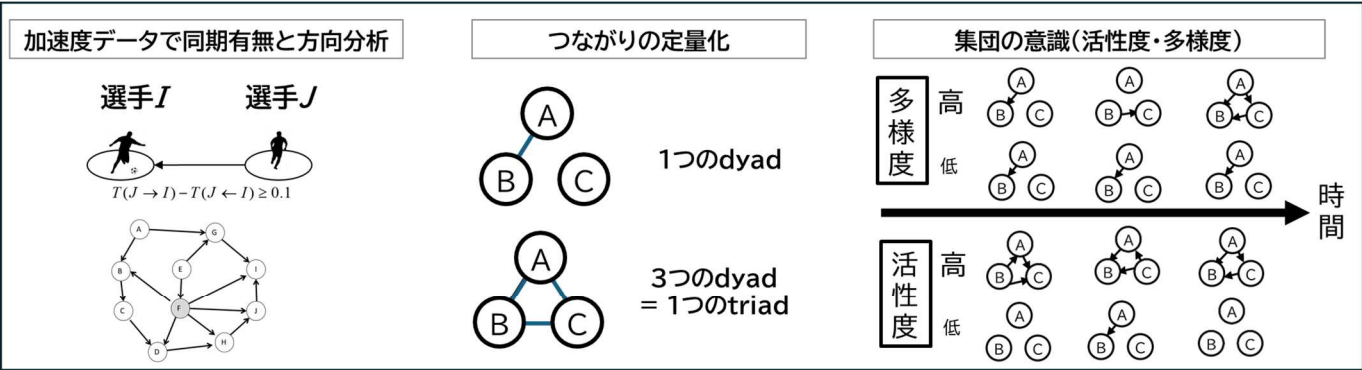


図1 サッカー試合における選手間協調ネットワークの例
左：ノードは各選手、エッジは移動エントロピーに基づく方向性のある影響関係を示す。
中：二者関係 (Dyad) と三者関係 (Triad) の頻度を算出
右：ネットワークを構成する人の入れ替わりの多寡を多様度、ネットワークの構築の頻度の多寡を活性度と評価

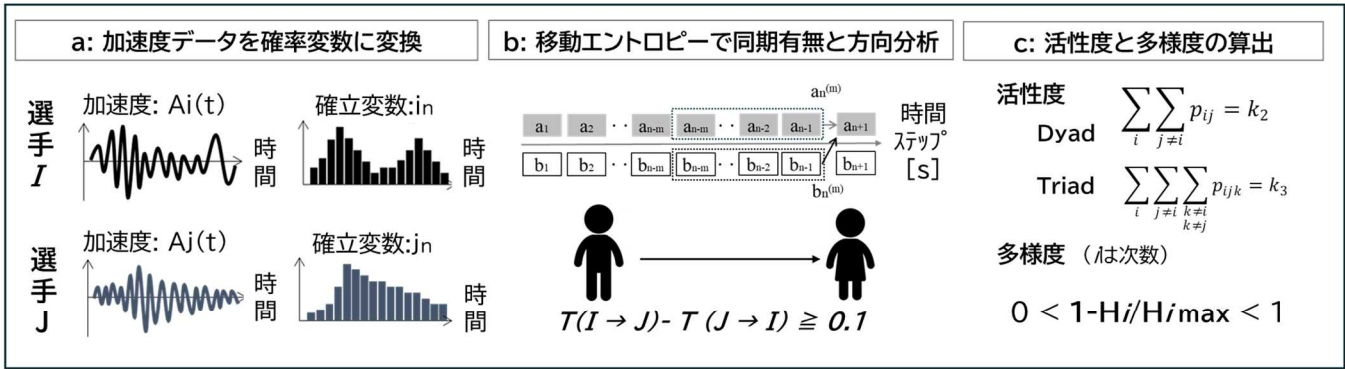


図2 加速度データと有向ネットワーク分析による協調行動の定量化手法
(a) 選手の三軸加速度データ2人の選手の加速度データを確率分布に変換。
(b) 移動エントロピーに基づき選手間の方向性をもつ影響関係を算出し $T(I \rightarrow J) - T(J \rightarrow I) \geq 0.1$ を満たす場合にリンクを構築。
(c) 得られたネットワークから、二者関係と三者関係の活性度および多様性指標を算出し、協調の頻度と変動性を評価した。

人のネットワークの定量化と内的・外的要因の相互影響分析: サッカーチームを例に

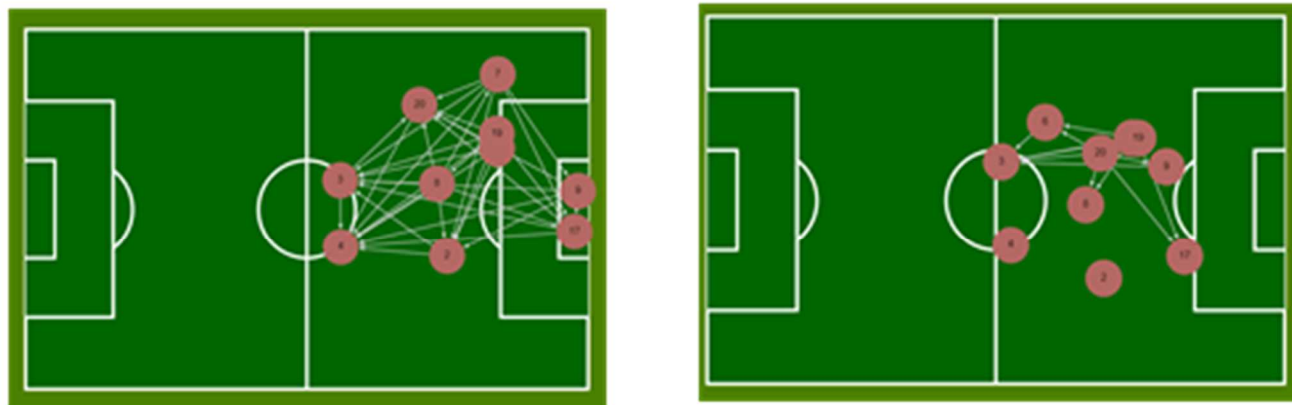


図3 協調ネットワーク分析の流れと代表的な結果

3-1 ネットワーク分析手法

本研究では、試合中に選手間で構成されるネットワークのうち、二者間 (Dyad) および三者間 (Triad) の構造を抽出し、その出現頻度を定量化するとともに、1 試合の前半・後半ごとに「頻度 (活性度)」と「多様性」を算出した (図 1)。選手間の協調状態を定量化するために、GNSS 搭載型三軸加速度計^{*1} で取得した運動データを用い、移動エントロピー^{*2} に基づく有向ネットワーク分析^{*3} を行った。まず、各選手の加速度データをベクトル合成値に変換し、移動平均処理により 1 秒ごとの運動強度データを得た。次に、確率分布に基づく正規化と離散化を行い、選手間の動作系列における「情報流 (移動エントロピー)」を算出した。これにより、ある選手の動作が他選手の直後の動作にどの程度影響するかを定量化し、方向性をもつリンクとしてネットワークを構築した (図 2)。さらに、能動的関与と受動的関与の比率を示す Interaction Dynamics Network (IDN) 指数を算出し、ポジション別 (DF, MF, FW) に比較した。(分析されたネットワークを図 3 に示す。)

3-2 パフォーマンスレベルとの関係の分析方法

外的要因を探るために、国内女子プロサッカーチーム (前期 7 試合、後期 8 試合) および大学女子サッカ

ーチーム (7 試合) を対象に、22 試合のデータを収集した。各試合において、前半と後半の Dyad・Triad の活性度、多様性、および IDN 指数を算出し、競技レベル間 (プロ vs 大学) および試合時間 (前半 vs 後半) の主効果と交互作用を二要因分散分析により検証した。さらに、ポジション別に IDN 指数の分布 (≥ 1.0 vs < 1.0) を χ^2 検定で比較し、プロチームにおけるポジション特性 (例: MF の能動性、DF の反応性) を明らかにした。その結果、プロチームは大学チームよりも Dyad と Triad の数が有意に多く ($p < 0.001$)、より複雑な協調構造を形成していた。また、両チームともに後半には多様性が低下したが、その減少は特にプロチームで顕著であった ($p < 0.001$)。さらに、ポジション別の IDN 指数の解析から、MF は能動的な関与が多く、DF や FW は反応的な関与が多いことが示された。

3-3 ケガとの関係の分析方法

内的要因との関係を探るために、シーズン中に外傷により 2 週間以上の練習離脱を経験した女子プロサッカー選手を対象とし、ケガ前後の公式戦におけるネットワーク変化を分析した。分析対象は、離脱前後で出場した試合において、当該選手が形成した Dyad および Triad の数である。特に、離脱直後の試合における IDN 指数や活性度・多様性の低下を検出し、復帰後数試合

人のネットワークの定量化と内的・外的要因の相互影響分析: サッカーチームを例に

にわたる回復過程を追跡した。これにより、競技復帰時における「つながりの質」の変化を明らかにし、再受傷予防やリコンディショニング支援に資する基盤情報を得ることを目的とした。その結果、4名の選手が対象者となり、下肢外傷前後では、試合中のIDN指数が受傷前よりも復帰直後で低値、すなわち受動的なネットワークを形成していた。対象者全員で低下が認められ、復帰後2試合で受傷前レベルに戻る者もいれば、4試合以上かかる者もあり、回復過程に個人差があることが確認された。

3. 将来展望

本研究は、スポーツ科学の枠を超えて、教育、医療、産業領域に広く応用可能である。第一に、競技スポーツにおいては、復帰直後の選手の能動的ネットワーク低下を早期に検出し、再受傷予防や戦術的適応の指標とすることが可能となる。第二に、企業組織では社員間のネットワークを分析することで、育休・産休後の円滑な職場復帰プログラムや、メンタルヘルス低下の早期発見につながる。第三に、教育現場では、保育園・幼稚園におけるネットワーク解析を通じ、神経発達症児の早期発見や支援の基盤構築に寄与することが期待できる。さらに、加速度センサを用いた手法は低コストかつ普及性が高く、誰もが利用できる「人のつながりの可視化技術」として発展し得る。これにより、ソーシャルキャピタルを定量的に評価し、Check-Action-Plan-Doの循環的改善サイクルを社会に実装する道筋が拓かれる。

おわりに

本研究は、サッカーをモデルとしながら、人の協調行動を「見える化」し、その形成要因や課題達成との関連性を明らかにする先駆的取り組みである。競技スポーツにおけるパフォーマンス向上やケガ予防の実用的貢献にとどまらず、社会全体のソーシャルキャピタル醸成に資する学術的・社会的意義をもつ。今後は、教育・福祉・職域といった多様な場面での応用を通じて、人のつながりを基盤とした持続可能な社会づくりに貢献していきたい。

用語解説

*1 GNSS搭載型三軸加速度計

GNSS (Global Navigation Satellite System: 全球航法衛星システム) による位置情報測定機能と、三軸方向 (上下・左右・前後) の加速度を同時に計測できるセンサを一体化した装置である。GNSSによりフィールド上での選手の位置や移動速度を把握し、加速度計により細かな身体の動きや運動強度を数値化できる。これにより、試合中の走行、方向転換、加減速などの動作を高精度に記録でき、選手間の動きの同期やネットワーク解析に活用できる。

*2 移動エントロピー

選手の動きが他の選手の動きをどの程度予測できるかを数値化する指標。三軸加速度データから運動強度の時系列を作成し、一人の選手の過去の動きが他の選手の未来の動きをどれだけ説明できるかを「情報量 (エントロピー)」として算出する。値が大きいほど、一方の選手の動きがもう一方に強い影響を与えていることを示す

*3 有向ネットワーク分析

選手を「ノード」、選手間の影響関係を「リンク」として表すネットワーク分析の一種。リンクには方向性があり、「誰が誰に影響を与えたか」を区別できるのが特徴。移動エントロピーに基づき、攻撃や守備の場面で「能動的」に動きを生み出したのか、それとも「受動的」に反応したのかを識別できる。これにより、Dyad (二者関係) や Triad (三者関係) の協調構造を定量的に把握できる。

参考文献

- [1] 田中毅、馬込卓弥、田附俊一、合田徳夫. (2021). 移動エントロピーを用いた集団スポーツにおける潜在的情報伝達の分析手法. 情報処理学会論文誌 62(2):737-746

この研究は、令和4年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和5～6年度に実施されたものです。