

AI ロボットとの協調に向けた役割分担の構造及び原理の同時解明*

研究代表者 静岡大学情報学部情報科学科

市川 淳

共同研究者 静岡大学工学部数理システム工学科

一ノ瀬 元喜

1. はじめに

私たちヒトがさまざまな知的活動を展開するうえで集団を組み、役割分担することは不可欠である。認知科学では、関連して分散認知の理論が提唱されている¹⁾。各自がサブシステムとして不均一な役割を担い、他のサブシステムや環境との相互作用を通じて全体が1つのシステムとして機能することが指摘されており、マルチエージェントシステムの基本的な考え方に合致する。役割分担をマルチエージェントシステムと捉え、高いチームパフォーマンスを達成する協調を検討することは重要である。協調に必要な役割や役割分担の構造、そして行動に至る情報処理を理解することで、技術が急速に発展している昨今、AI ロボットとヒトの円滑で安全な集団行動に関する提言につながるだろう。

今回、役割分担が見られる典型として集団スポーツに着目する。サッカーやバスケットボールでは、共通目標を達成するために各選手が役割(ポジション)を担い相互作用する。本研究では、ルールなどで動きが適度に統制され、位置データから定量的に分析・評価できる点を考慮して、集団スポーツを対象とする。協調の研究は分野を横断して、そのメカニズムが議論されている。しかし、分野間のアプローチや方法などの違いから、包括的な理解については未だ検討事項がある。例えば、ネットワーク科学では、数理モデルに基づく手法により、様々な現象における時間発展しやすい動的な相互作用の力学構造を検証できる^{例:2)}。ただし、集団や個人がどのように情報処理しているかは議論されておらず、ある構造が現れる原理までは検討されていない。また、認知科学は主に仮説検証型の参加者実験から、複数条件でチームパフォーマンスを統計的に比較することで背後の情報処理を明らかにしてきた^{例:3)}。しかし、サッカーやバスケットボールに代表される集団運動を計測して分析した研究は少ない。

そこで、本研究では異分野融合のアプローチをとり、協調メカニズムを検討する。具体的には、申請者らが専門とする認知科学とネットワーク科学のアプローチを相補的に利用する。ゆえに、本研究では、協調における重要な役割と背後の情報処理を認知科学的に検証し、その役割に関係する相互作用(連携)の詳細をネットワーク科学の手法から同時解明することを目的とする。2章では3on3バスケットボールを題材としたフィールド実験について説明し、3章はオフェンスの連携で鍵となる役割とその情報処理を認知科学的に検討した成果を報告する。4章では前章を踏まえ、当該役割によるプレーのスペースを分析したネットワーク科学の成果を報告する。5章では総合考察を行い、本研究の学術的・社会的意義を議論する。最後に、6章で主旨をまとめる。

* 本報告書は、主要な成果^{4),5),6)}を踏まえて作成した。

2. 3 on 3 バスケットボールのフィールド実験

東海学生バスケットボール連盟の三部リーグに位置する、大学女子チームの選手 6 名が参加するフィールド実験を実施した。実験者並びに選手が所属する大学の人を対象とする研究に関する倫理審査の承認、及び全員から書面にて参加への同意が得られた。なお、本実験は、先行研究^{7), 8), 9)}で用いられた実験室課題からチームパフォーマンスの向上に関係することが示唆されている役割の有用性を検証するために実施された（役割の詳細は 3 章を参照）。選手たちは実力が拮抗するようにオフェンスとディフェンスチームに分かれ、以下のミニゲームを行った。

ミニゲームは、オフェンスの連携を想定し考案された（図 1）。特定の役割を中心とした協調を検証することを考慮して、勝利条件は「制限時間 15 秒以内に誰かがディフェンスを引き寄せたうえで、ノーマークからシュートを打つこと」にして、個人スキルに依存しないように設定した。一方で、ディフェンスチームは、上記の条件を満たさないように守ることが要求された。その他、次の関連したルールを設けた。開始時のオフェンスチームにおけるボール保持者（丸 1 番）、3 名の立ち位置、そして各選手をマークするディフェンス選手の対応関係は固定した。さらに、ボール保持者から最も離れている、連携で鍵となる役割を担う選手（丸 3 番）に直接パスして開始することも禁止された。加えて、利き手の影響を除外するために、初期位置の 2 on 2 がゴールに対して右側と左側の構図どちらかを直前に指示して試合間でランダム化した。

オフェンスチームが勝つためには、丸 3 番の役割、プレーが重要である。この選手は、丸 1 番や丸 2 番のプレーをサポートしたり、パスを出しやすいスペースに移動してシュートを狙ったりする動きが求められる。専門的にいえば、丸 1 番や丸 2 番と連携して直接ボールを受け渡しするハンドオフ、相手ディフェンスの壁となるピックアンドロール、空いたコーナーに移動してスリーポイントシュートを狙うことが考えられる。つまり、状況に応じて味方に介入し、自身の動きを調整する。一方で、状況に応じてあえて介入せずに動かず、味方のプレーを邪魔しないことも重要である。これらは、5 人制であっても要求されるオフェンスの基本である。

本ゲームは、前半戦と後半戦でそれぞれ、7 試合 1 セッションとして計 3 セッション実施された。前半戦の後、コーチが上述した丸 3 番のプレーを中心に、振り返りを兼ねてオフェンスチーム全体へアドバイスをを行った。他方で、ディフェンスチームに対しても、今回のゲームや特定の選手への対策ではないヘルプディフェンスの一般についてアドバイスした。全試合において選手の動きはビデオカメラで俯瞰撮影され、実験後に画像処理から二次元の位置座標を計測・取得した。

3. 協調における重要な役割の認知科学的検討

ここでは、ミニゲームの勝率や鍵となる介入判断と調整を行う役割（図 1 の丸 3 番）に関係するプレーを分析して助言の前後で比較した。もし、当該役割が有用であれば、後半戦は前半戦に比べて勝率が高くなり、選手の動きにも差がみられると考えられる。主要な結果を報告する。



図 1：フィールド実験で行ったミニゲームと俯瞰撮影した映像¹

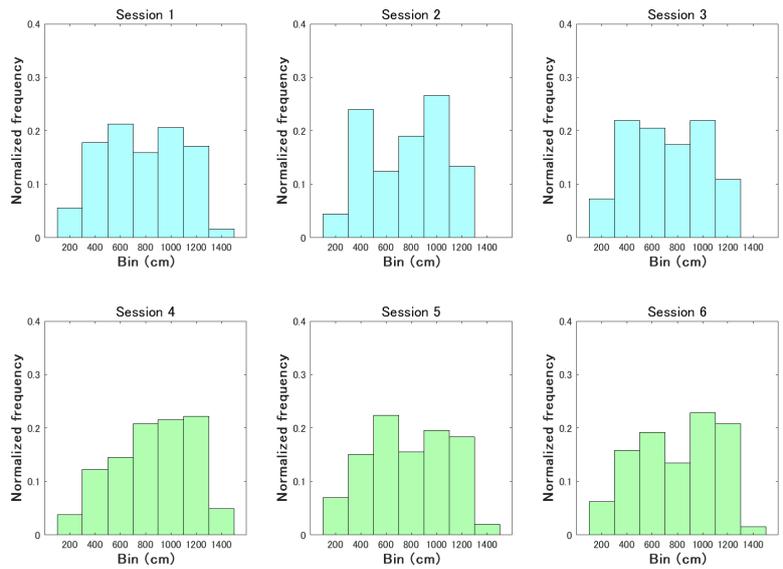
チームパフォーマンスとしてセッションを通じた勝利数の推移をみたところ、前半戦は7試合で最大4勝とチャンスレベルの勝率であったが、後半戦は最大6勝まで向上した。しかし、最後のセッションで1勝まで下がった。次に、各選手の位置座標が格納されたデータセットを使って、オフェンスチームの丸3番と丸1番、丸2番との距離(cm)、丸3番とディフェンスの各選手との距離を各時間フレームでそれぞれ算出し、全ての距離データからヒストグラムを作成した。そして、各階級で前半戦と後半戦の全試合から、正規化された頻度の平均を求めて統計的に比較したところ、以下の特徴が確認された。介入判断と調整を行う役割と相手ディフェンスとの距離については、相対的に値が大きい階級で後半戦の方が前半戦よりも有意に頻度が高くなり、値が小さい階級では逆に頻度が低くなった ($ps < .05$, 図2上段の400 cm, 1200 cm, 1400 cmの階級)。一方で、当該役割と味方との距離に関しては、相対的に距離の値が大きい階級と小さい階級で後半戦の方が前半戦よりも有意に頻度が高くなり、中程度の階級で逆に頻度が低くなる傾向が確認された ($ps < .10$, 図2下段の200 cm, 800 cm, 1600 cmの階級)。

助言後に介入判断と調整を行う役割が味方と近い距離をとる傾向は、2章で説明したハンドオフやピックアンドロールの介入行動を示唆する。さらに、味方や相手ディフェンスと遠い距離をとる傾向は、空いたコーナーに移動してスリーポイントシュート狙う介入行動、あるいは介入せずに動かず、ゴールに向かう味方から離れてプレーを邪魔しない特徴が反映されているかもしれない。適切な役割遂行が距離に現れ、チームパフォーマンスの向上と関連する可能性がある。ただし、最後のセッションで勝率が下がった

¹ 報告書に沿って文献⁴⁾の掲載図を修正した。

結果は、ディフェンスチームの対策が要因として挙げられた。三部リーグのチームに対して1回の助言だけでは限界があった点に留意すべきだが、協調における重要な役割の有用性は少なからず示された。当該役割ではプロセスにおいて、状況に応じて味方や相手ディフェンスとの距離が調整されている可能性がある。他方で、選手間の距離に関する分析の基本しか行っていないため、プレーのスペースをどの程度確保していたかや、スペースを利用してどのように連携していたかなどは未だ検討事項がある。そこで、選手が活用するスペースをネットワーク科学から検証した。

Distance between the offensive player required in the role of intervention decision and adjustment and each defensive participant



Distance between the offensive player required in the role of intervention decision and adjustment and each other participant

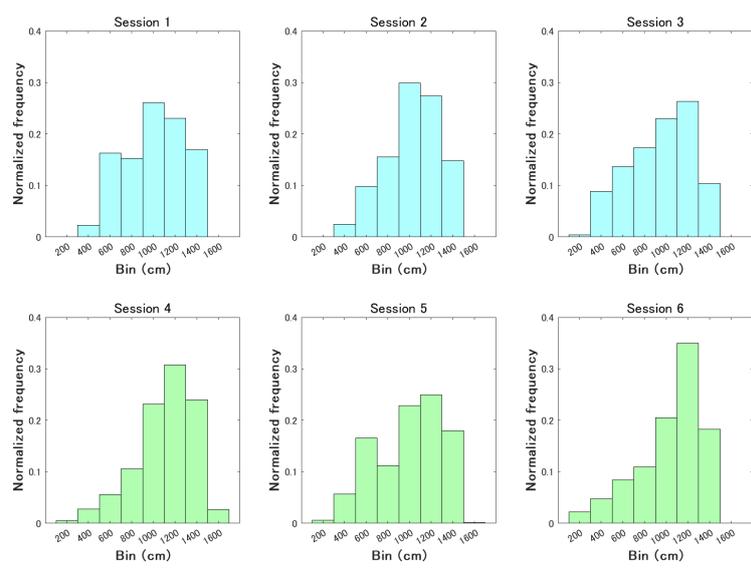


図 2：オフenseチームの協調において重要な介入判断と調整を行う役割を担う選手（図 1 の丸 3 番）との距離（cm）に関するヒストグラム²。

² 報告書に合わせて文献⁴⁾の掲載図を修正した。

4. 協調における重要な役割のネットワーク科学的検討

フィールド実験のデータセットを使って、選手が活用するスペースを捉えるためにボロノイ図による幾何学分析を行った。ボロノイ図は、二次元上の選手の位置を点で表すとして、全選手間（二点間）の組み合わせで垂直二等分線を作成することでスペースを算出できる。これは、選手の点と同じスペースにおける任意の点との距離が、他のスペースにいる選手の点よりも近いことになる（図 3 上段）。各時間フレームで選手ごとにスペースを計算し、前半戦と後半戦で 1 試合あたりの面積の平均を比較した。

結果、介入判断と調整を行う役割を担う選手（図 1 の丸 3 番）の後半戦におけるスペースが前半戦よりも有意に狭くなる一方で、丸 1 番のスペースが広がることを示された（ $p < .05$, 図 3 下段）。試合映像を見ると、助言後に次のようなプレーや連携が現れたことが示唆される。当該役割は、コーナーに移動して味方からパスを受けてスリーポイントシュート狙うだけでなく、端へ移動することで味方のプレーを邪魔しないようにスペースをつくり出していた可能性がある。3 章で説明した介入する・しないの判断に基づく行動を同時並行的に体現していたと推察される。

協調における重要な役割のプレーや連携をネットワーク科学から検討することで、認知科学のアプローチだけでは発見が困難な特徴が示された。さらに、行動に至る情報処理と関連づけることで、ネットワーク科学では議論されない知見が得られた。

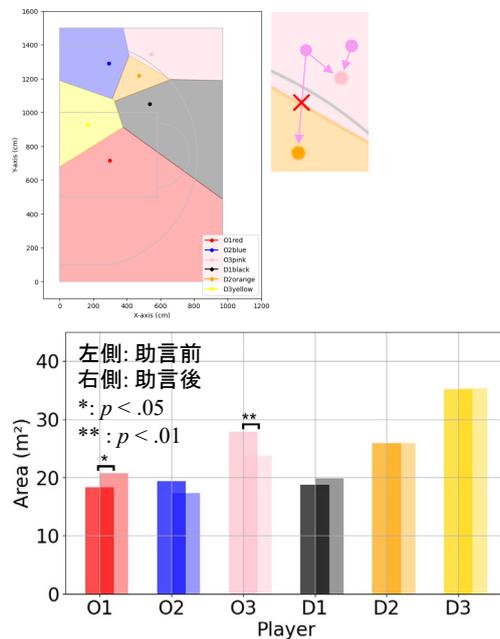


図 3：ボロノイ図による幾何学分析の概要と各選手が活用する 1 試合あたりのスペースの平均³

5. 総合考察

本研究では、3 on 3 バスケットボールを題材に、認知科学とネットワーク科学のアプローチを相補的に利用して協調における重要な役割と背後にある情報処理、及びその役

³ 報告書に沿って文献⁶⁾の掲載図を修正した。

割のプレーや連携を検討した。結果、介入判断と調整を行う役割がチームパフォーマンスに関連する可能性が確認された。既存の理論（例えば、同期理論¹⁰⁾）では説明が難しい役割の有用性が、スポーツ現場で示唆された。さらに、選手は介入する・しないの判断に基づく行動を同時並行的に体現し、状況に応じて連携する可能性が示された。認知科学とネットワーク科学の異分野融合から、役割分担の構造と基盤にある原理を同時解明したといえるだろう。

今後は、知見の一般性だけでなく、介入判断と調整を行う役割を中心とした連携を体現するにあたり、どの程度選手間で情報を共有する必要があるかなどを検証する予定である。集団スポーツに限らず重要な観点であり、掛け声や目配せなどを通じて注意（情報）を共有しつつ、判断して動く場面は数多く見られる。AIロボットとの円滑で安全な集団行動を実現するためには、ヒトの協調に関する知見を蓄積する必要がある。

6. まとめ

本研究は、認知科学とネットワーク科学のアプローチを相互補完して、3 on 3 バスケットボールを題材に協調における重要な役割とその情報処理、及び役割のプレーや連携を検討した。フィールド実験及び定量的な分析を通じて同期理論では説明が難しい、介入判断と調整を行う役割のスポーツ現場での有用性が示唆された。さらに当該役割は、介入する・しないの判断に基づく行動を同時並行的に体現し、連携する特徴が確認された。AIロボットとの円滑で安全な集団行動を実現するためには、ヒトを対象にした知見を一つ一つ蓄積することが求められる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、特に公益財団法人天野工業技術研究所 2023 年度特別募集助成から多大なご支援を頂きました。当財団の報告書に記して謝意を示します。また、フィールド実験でご協力いただいた高村 成寿様（ベルテックス静岡アカデミーコーチ）、市川 雅也さん（静岡大学）に感謝申し上げます。そして、祝原 豊准教授と竹内 勇剛教授（ともに静岡大学）から有意義なご意見をいただきましたことに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hutchins, E.: *Cognition in the Wild*. MIT Press, 1995.
- 2) Ichinose, G., Tsuchiya, T., & Watanabe, S.: Robustness of football passing networks against continuous node and link removals. *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 147, 110973, <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110973>, 2021.
- 3) Hayashi, Y.: The power of a “Maverick” in collaborative problem solving: An experimental investigation of individual perspective-taking within a group. *Cognitive Science*, Vol. 42, No. S1, pp. 69-104, 2018.
- 4) Ichikawa, J., Yamada, M., & Fujii, K.: Analysis of coordinated group behavior based on role-sharing: Practical application from an experimental task to a 3-on-3 basketball game as a pilot study. *bioRxiv*, <https://doi.org/10.1101/2024.09.16.612561>, 2024.

- 5) 市川 淳: 集団スポーツを用いた認知科学を軸とする協調性の学際的理解と展望. 人工知能学会誌, Vol. 40, No. 1, pp. 26-32, 2025.
- 6) 一ノ瀬 元喜, 八木 翔摩, 廣瀬 功季, 市川 淳, 山田 雅敏, 藤井 慶輔: 3 on 3 バスケットボールにおけるオフense連携構造の幾何学的抽出. 情報処理学会研究報告, スポーツ情報学, Vol. 2024-SI-1, 32, 2024.
- 7) Ichikawa, J., & Fujii, K.: Analysis of group behavior based on sharing heterogeneous roles in a triad using a coordinated drawing task. *Frontiers in Psychology*, Vol. 13, 890205, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.890205>, 2022.
- 8) Ichikawa, J., & Fujii, K.: Force-based modeling of heterogeneous roles in the coordinated behavior of a triad. *New Generation Computing*, Vol. 42, <https://doi.org/10.1007/s00354-024-00277-y>, 2024.
- 9) Ichikawa, J., & Fujii, K.: Force-based modeling of a resilient helping role in coordinated behavior of a triad. *Proceedings of the 26th International Conference on Human-Computer Interaction 2024 (HCI International 2024)*, pp. 148-155, 2024.
- 10) Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T.: Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 16, No. 2, pp. 227-247, 1990.