

# 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

田中 毅<sup>1,a)</sup> 馬込 卓弥<sup>2,3</sup> 田附 俊一<sup>4</sup> 合田 徳夫<sup>5</sup>

受付日 2020年4月17日, 採録日 2020年11月5日

**概要:** スポーツの効果的な選手指導を目的とし、センサなどのデータ分析を用いた定量的かつ客観的な選手のパフォーマンス評価が期待されている。従来、運動強度や速度などの個人パフォーマンス指標の導入は進んでいるが、同様に重要とされる組織的パフォーマンスにおいては、映像観察などに基づいており、実用的な分析手法がなかった。そこで本研究では、センサで計測した2者の加速度データから潜在的情報伝達を推定する移動エントロピーを用いた分析手法を提案し、サッカー U-18 チームを対象として練習試合中の選手の加速度データを収集し、提案手法の妥当性・有用性を評価した。評価の結果、指導者が抽出した組織として意図する攻撃ができていているシーンにおいて、チーム間の情報伝達が統計的に有意に高まることを確認し、集団スポーツにおける選手間の駆け引きを定量化できる見通しを得た。

キーワード: ウェアラブルデバイス, 加速度センサ, 移動エントロピー, スポーツ

## Analysis of Potential Information Transmission with Transfer Entropy in Team Sports

TAKESHI TANAKA<sup>1,a)</sup> TAKUYA MAGOME<sup>2,3</sup> SHUNICHI TAZUKE<sup>4</sup> NORIO GODA<sup>5</sup>

Received: April 17, 2020, Accepted: November 5, 2020

**Abstract:** The quantitative and objective evaluation of player's performance by applying data analysis is needed to achieve effective sports coaching. In conventional, personal performance index such as exercise intensity and moving speed is introducing to team sports. However, evaluating organizational performance that is one of the most important factors in team sports is mainly based on video observation, and the evaluation is not practical for sports coaching. In this research, we propose a novel data analysis method by using transfer entropy to estimate potential information transmission between two players from the two series of acceleration data, and evaluate validity and usefulness of our method through the experiment on the U-18 football team. In result, we confirmed that the information transfer between the team in the specific scene that the team coach extracted as organized situation statistically significantly increased. This result suggests that our proposed method realize to quantify tactics in team sports.

**Keywords:** wearable device, accelerometer, transfer entropy, sports

<sup>1</sup> 株式会社日立製作所研究開発グループ  
Hitachi Ltd. R&D Group, Kokubunji, Tokyo 185-8601, Japan

<sup>2</sup> 追手門学院大学社会学部  
Otemon Gakuin University, Ibaraki, Osaka 567-8502, Japan

<sup>3</sup> 大阪大学大学院医学系研究科  
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>4</sup> 同志社大学スポーツ健康科学部  
Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0394, Japan

<sup>5</sup> 株式会社日立製作所  
Hitachi Ltd., Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

a) takeshi.tanaka.nz@hitachi.com

## 1. はじめに

各国のオリンピック選手育成の強化やプロスポーツへの投資拡大にともない、スポーツ分野における IT を活用した分析が注目されている。特にプロスポーツが発達しているサッカーなどの集団スポーツにおいては、GPS や加速度センサを搭載したウェアラブルデバイスが普及しており、様々なセンサデータが選手のトレーニング強度やコンディション管理に用いられている [1], [2]。近年では、映像解析

技術の発達にともない、高精細な映像から選手や動作を認識する技術が研究開発されており、将来的に選手への負荷がより少ない非接触なセンシングが期待されている。現状では、個人の識別に背番号を用いることや人手による修正も必要であることもあり、俯瞰的な映像が取得できる競技場で行われるプロスポーツの試合に主に適用されており、日常的なトレーニングや練習試合の計測においてはウェアラブルデバイスが広く用いられている。

サッカーなどの主要な集団スポーツの強化に向けては、定量的なデータに基づくパフォーマンスの評価が重要とされる [3], [4]。集団スポーツのパフォーマンスには、選手の個人パフォーマンスと組織的パフォーマンスがあり、個人パフォーマンスの評価には、ウェアラブルデバイスや映像解析のデータを用いて移動距離や移動速度、運動負荷などのフィジカルパフォーマンスを評価する手法が用いられており、怪我の予防などにも活用されている [5], [6]。一方で、同様にチームスポーツで重要となる組織的パフォーマンスに関しては、チームとしての戦術が期待どおりに機能しているか評価するため、ボールに関わる味方選手間の連携やその相手選手との駆け引きの分析指標が研究されており、選手間または選手とゴールとの間の距離や位置関係に対する数理的アプローチなどが示されている [7], [8]。選手間の連携や駆け引きは、個々の視覚的情報に基づく状況判断からの味方との意思の疎通や、相手選手の次のプレーに対する予測などに基づいており、選手の感覚を通じた潜在的な情報伝達が行われていると見なすことができる。このような潜在的な情報伝達はスポーツのプレーを通じて常時行われていると考えられ、サッカーなどのボールを用いる競技ではボールに関わる場面だけでなく、ボールに関わらない場面にも着目する必要がある。多くの指導理論においてボールを持たない場面での動きの重要性や指導方法が提唱されている [9], [10], [11]。しかしながら、従来研究では、ボールに関わらないシーンも含めた一貫した選手間の情報伝達の分析が行われていなかった。また、映像を用いた目視による分析が多く、スポーツの指導者が指導する全選手の動きを細かく確認することや、定量的な比較ができないことから、指導の現場でリアルタイムに分析した結果を用いてトレーニングの効果をその場で確認することや、選手の上達などの変化を後から振り返って把握することが困難であった。

本研究では、選手間の潜在的な情報伝達に着目した、選手の組織的パフォーマンスの定量化を目的とし、移動エントロピーを用いた分析方法を提案する。移動エントロピーは、情報理論に基づき時系列データ間の因果関係を表す指標であり、神経回路 [12]、人の多感覚のコミュニケーション [13]、SNS と商品購買の相互関係 [14]、共同注意 [15]、投資指標 [16] などの研究が行われている。また、同時計測した独立したデータ間に適用できるため、普及が進むウェア

ラブルデバイスのデータ分析に実装が可能である。筆者らは、日常のトレーニングで簡便に用いることができるウェアラブルデバイスで計測する加速度データを用いた分析手法の検討と、実際に集団スポーツであるサッカーの試合を対象に選手のデータを収集して分析し、妥当性や有用性の評価を行った。

## 2. 研究方法

### 2.1 ウェアラブルデバイスによる動きの計測方法

各選手の動きの情報を収集するため、加速度センサを搭載したウェアラブルデバイスの活用を検討した。加速度センサは人のいずれかの部位に装着するだけで、人ごとの運動の状態を簡便に計測できる。また、小型・軽量であるためスポーツ選手が装着することに対する負荷や違和感を最小限にすることができる。よって、加速度センサを活用することで、場所の制限なく、試合や日常のトレーニングにおいても、運動の情報を計測できる。本研究では、対象とするサッカーなどで選手のプレーを阻害せず、かつ安全性に問題がないことを確認したうえで、リストバンド型のウェアラブルデバイス (A&D 社製 UW-301BT) を用いた (図 1, 表 1)。本研究で使用したリストバンド型のウェアラブルデバイスで計測した利き手とは反対側の手の加速度データは、体幹部で計測した運動強度と相関性が高いことが報告されている [17]。本研究で実施した計測実験では、各選手に、1 台のリストバンド型ライフレコーダを利き手



図 1 ウェアラブルデバイスの外観

Fig. 1 Appearance of wearable device.

表 1 ウェアラブルデバイスの性能

Table 1 Specification of wearable device.

Size/Weight	20 mm (W)×39 mm (L)×14 mm (H) / 20 g
Measurement data	3-D acceleration (±4 G)
Sampling rate	20 Hz
Communication	Bluetooth, USB
Battery	160 mAh (Lifetime:10 days)

とは反対側の手首に装着してもらい、試合中およびトレーニング中における腕の加速度データを計測する。また、今回用いたリストバンド型ライフレコーダは Bluetooth による無線は搭載しているものの無線通信可能な距離が 10 m 程度であり、スポーツのフィールドすべてをカバーすることができないため、計測された加速度データは、試合およびトレーニング終了後に USB 接続で収集を実施する。

## 2.2 移動エントロピーの算出方法

選手の組織的パフォーマンスの定量化に向け、移動エントロピーを活用した 2 者間の潜在的情報伝達の分析手法を検討した。移動エントロピーは、同じ人間計測分野である脳計測において、各ニューロンの活動を示す時系列信号から神経伝達を推定する手法としても用いられる。2 つの信号間における関係性を調べる代表的な方法としては、相互相関関数、コヒーレンス関数などの線形解析法や、相互情報量、相対エントロピーなどを用いる非線形解析法があげられる。これらは、2 つの信号間における関係の強さの程度を評価するのに適しているが、2 つの信号に対して対称な形をしているため、因果性という情報の流れる方向まで含めて解析することには適していない。これに対し、因果関係の推定に適した方法として、移動エントロピーの適用が近年進められており、移動エントロピーは非線形的な変動をする信号間にも適用できることが分かっている。そこで本研究では、同じフィールドで同時にプレーをする 2 選手の加速度信号から移動エントロピーを算出し、集団スポーツのチームにおける潜在的情報伝達の構造を可視化する手法を提案する。

提案手法の処理の流れを図 2 に示す。

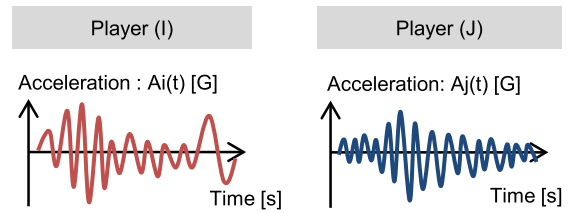
(1) の処理では、各個人の動きを時刻が同期された加速度センサで計測する。

(2) の処理では、加速度データの振幅強度を 1 秒幅で加算した値を選手の運動強度の指標として集計する。1 秒幅のデータ幅はサッカーなどのフィールドスポーツのプレーの切り替わりを示すために十分細かい粒度であり、また通信やデータの保存に適した実用的なサイズにデータを圧縮することができる。

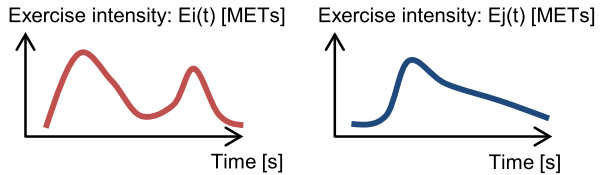
(3) の処理では、各個人の変数（運動強度）の時系列データを、各個人の運動強度を  $k$  分割のヒストグラムとなる離散値に変換することにより、正規化された離散確率変数に変換する。ヒストグラムの分割数  $k$  はスタージェスの公式に基づいて決定した。この結果、個人の運動強度の差を吸収し、相対的な幅を持つ変数として表すことができる。

(4) で、2 選手の変数間の情報伝達量を移動エントロピーから算出する。ここで、時間ステップ  $n$  における確率変数  $I, J$  の要素を  $i_n, j_n$  とした場合、 $I$  に対する、 $J$  の影響を示す移動エントロピー  $T(J \rightarrow I)$  は図中の式により算出される。

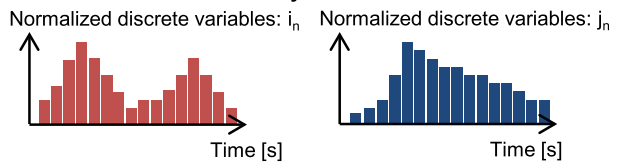
### (1) Measure 3-D acceleration data with wearable sensor



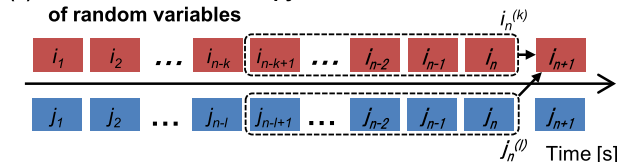
### (2) Estimate exercise intensity every seconds from acceleration data



### (3) Calculate the normalized discrete variables from the exercise intensity.



### (4) Calculate transfer entropy between two series of random variables



$$T(J \rightarrow I) = \sum P(i_{n+1}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log \frac{P(i_{n+1} | i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{P(i_{n+1} | i_n^{(k)})}$$

$$i_n^{(k)} = (i_n, i_{n-1}, \dots, i_{n-k+1})$$

$$j_n^{(l)} = (j_n, j_{n-1}, \dots, j_{n-l+1})$$

図 2 選手間の移動エントロピーの算出手順

Fig. 2 Process to calculate transfer entropy between two players.

本研究では、選手同士で直前の動きが与える影響のみを考慮する最もシンプルなモデルを使った評価を行うため、 $k = l = 1$  と設定する。この場合、 $P(i(n+1), i(n), j(n))$  は  $i(n+1), i(n)$  と  $j(n)$  の同時確率を、 $P(i(n+1)|i(n))$  は  $i(n)$  であるとき、 $i(n+1)$  になる条件付き確率を表す。 $I$  と  $J$  という 2 つの時系列データがあったとき、 $I$  の過去の系列から  $I$  の次の状態を予測する不確実さに比べて、 $J$  の過去の系列を加えた場合に、相対的に変化する不確実さの程度を測ることができる。移動エントロピーは、0~1 の値をとり、 $I$  と  $J$  の因果関係があるほど大きい値を示す。本研究では、1 秒ごとに集計した運動強度の時系列データを用いるため、 $J$  の運動強度が、 $I$  と最も近い未来で影響が強いと考えられる 1 秒後に与えた影響を算出する。



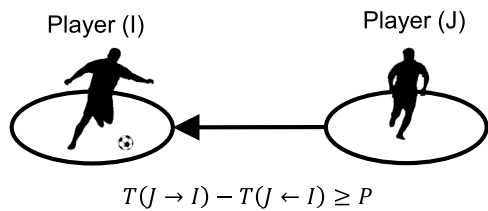


図 3 選手間の情報伝達を示す有向グラフ

Fig. 3 Digraph showing information transfer between two players.

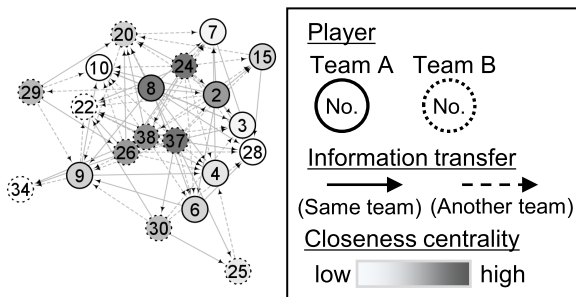


図 4 情報伝達ネットワークの表示例

Fig. 4 Example view of network showing information transfer.

### 2.3 組織ネットワークの可視化方法

上記で求めた移動エントロピーを用いて、集団スポーツのチームにおける潜在的な情報伝達のネットワークの可視化を行う。可視化においては、様々なグラフ分析手法が適用可能な図 3 に示す有向グラフによるネットワークを用いる。有向グラフのネットワーク分析はインターネット上のコンテンツ検索の効率化や SNS (Social Network Service) のコミュニティ分析など様々な問題に適用されている [18], [19]。有向グラフの接続の方向と有無は 2 選手間の移動エントロピーの双方向の差が一定閾値以上であることを、選手間で一方に明らかな情報伝達があったものとして決定した。閾値  $P$  はネットワークとして可視化した際に認識しやすい情報量の観点から、1 選手あたりの平均次数が全選手の人数の半分程度になるようにチューニングした。

本研究で対象とした後述のサッカーの計測実験のデータを可視化した結果を図 4 に示す。ネットワークの状態を把握しやすくするために、チームごとに選手を示すノードの線を実線と点線とし、ノードには選手固有の背番号を記載した。各選手の配置は、ばねモデルに基づき配置している。図 4 の表示例では、一般的に用いられるネットワークの特徴を示す指標の中で、特に代表的な指標である“次数中心性”と“近接中心性”について見て理解できるように可視化している。

次数中心性はネットワークの中で他のノードとの直接的な関わりの多さを示しており、ノードに接続されている矢印の数(“次数”)に着目し、全体の中における相対的な次数の大きさで視覚的に判断することができる。たとえば、

A チームの 28 番や B チームの 22 番は、接続されている矢印、特に相手チームからの矢印が多いことが見て分かり、次数中心性が高いといえる。

近接中心性とは、他の頂点(選手)との距離が小さい頂点(選手)ほどを高く評価する指標である。つまり、近接中心性が高い選手はネットワーク上のあらゆる選手とコンタクトがとりやすく、情報を迅速に提供しやすいという意味で、ネットワーク全体に影響力が高い選手であるといえる。近接中心性は塗りつぶす色の濃さとして表した。たとえば、A チームの 8 番、B チームの 37 番は近接中心性が高いといえる。算出方法は、まずある頂点から他の頂点への最短距離の合計を算出する。最短距離とは、ある頂点から他の頂点へ最短で到達するために通る辺の数である。近接中心性は、ある頂点から他の頂点への最短距離の逆数であるため、算出した最短距離を用いて、近接中心性を算出する。また、近接中心性はネットワークに含まれる頂点の数によって異なるため、その集団で近接中心性が理論的に最大となる値で割ることによって、標準化する。個体数  $n$  の集団においては、近接中心性の最大値は  $1/(n-1)$  であるため、標準化された近接中心性は  $1/(n-1)$  で割った値となる。

### 3. 実験方法

提案手法の有用性を評価するため、日本のプロサッカーチーム(J1 所属)の下部組織である 18 歳以下チームを対象として、チーム内の練習試合中のゴールキーパーを除く選手の動きを計測する実験を実施し、提案手法による分析を行った。対象者は 15 歳~18 歳の 30 名のチーム所属選手で、14 名がチーム内の指導者によって選抜された A チームで競技のパフォーマンスが高いチームである。16 名はそれ以外の選手で構成する B チームである。対象とした試合は、15 分の試合時間を目安に 3 回実施し、実際には約 16 分、約 18 分、約 15 分であった。試合に出場している選手はゴールキーパーを除くと各チームで 10 名であり、出場していないサブ選手との交代は 3 回の試合の合間などで行い、チーム所属選手全員が出場した。また、試合結果は 3 回通じて 2-0 のスコアで A チームの勝利であった。

提案手法で移動エントロピーを算出する時間単位は、後述するチームの指導者が攻撃場面を評価することを想定し、サッカーにおいてチームが 1 回の攻撃時にボールを保持してプレーする時間が典型的に 1-60 秒程度で広く分布していることから、1 回のプレーを包含する 1 分単位とした [20]。1 分単位の各時間において、出場している各選手間の移動エントロピーを算出し、ネットワーク図を生成した。有用性の評価は以下に示す 2 種の方法で行った。また、本研究のデータは(株)日立製作所研究開発グループで定める倫理審査基準ののっとり、取得した。

(1) 戦況との定性的な比較

提案手法の結果の妥当性を検討するため、3回の試合のうち、最も両チームの攻守の均衡があった1試合（3試合目）を対象に、チームの指導者（日本サッカー協会のコーチ資格を有する）による映像確認を行い、試合を約5分で3分割した序盤、中盤、終盤のシーンで、ゴール機会に関わる特徴的なプレーを中心に戦況を端的に表現してもらい、ネットワーク図との定性的な比較を行った。本比較においては、各シーンの該当する5つのネットワーク図を指導者に提示し、それぞれのネットワークの選手の関係性などの特徴を著者らが説明したうえで最も戦況を表しているものを1つ選択してもらい、妥当性について著者らと指導者で共同作業により確認した。

(2) 専門家の評価との定量的な比較

試合後に試合中の映像をチームの指導者に目視で確認してもらい、チームの指導コンセプトに合致する組織的なプレーができていたシーンを分単位で抽出した。対象チームの指導コンセプトは短いパスの交換により相手の守備の選手を動かして攻めるポイントを探ることが中心となっており、抽出したシーンはそれぞれコンセプトに合致したうえで、得点のシーン、およびシュートなど得点の可能性が高まっているシーンであり、全49分中から9分が抽出された。抽出されたシーンはすべてAチームがボールを保持して攻撃するシーンであった。分析結果との比較においては、各分の移動エントロピーを用いたネットワークから各チームの1選手あたりの平均次数、チーム内のつながりのみの平均次数、AチームからBチームへのつながりのみの平均次数、BチームからAチームへのつながりのみの平均次数を算出し、それぞれの指標が抽出したシーンとその他のシーンで統計的な差異の有無を評価し、結果の解釈について考察を行った。有意差の評価には、対応のない2群のT検定としてWelch's t-testを用い、有意水準を0.05とした。

4. 結果

4.1 定性評価

計測したデータから選手間の移動エントロピーに基づくネットワーク図を作成するにあたり、図3に示した有向グラフを生成するための閾値  $P$  を設定した。設定にあたり、毎分の出場している全選手間の移動エントロピーを算出したうえで、閾値  $P$  を0から0.3の間で変えた際の選手1人あたりの平均次数を算出し、図5に示す。  $P$  が増加すると選手1人あたりの次数は指数関数的に減少することが分かる。本研究では、前章で述べたように次数を全結合の半数以下とするため、本結果から  $P = 0.1$  と設定した。この閾値をすべてのネットワーク図の作成に適用した。

提案手法によって作成したネットワーク図が試合の戦況に対して妥当な状態を表現しているか確認した。序盤の

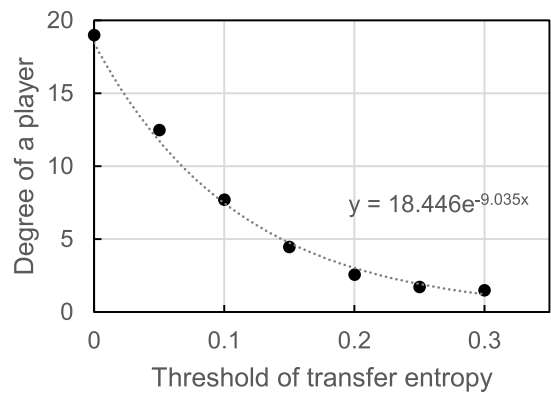


図5 移動エントロピーの閾値  $P$  による選手1人あたりの平均次数  
 Fig. 5 Degree of a player by setting threshold ( $P$ ) of transfer entropy.

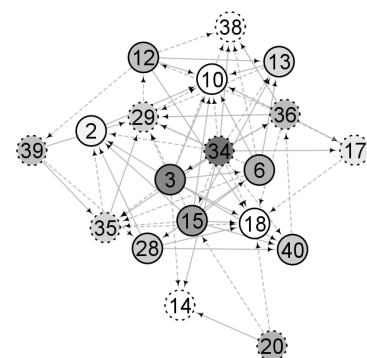


図6 BチームMF (34, 36) がプレスをかける場面のネットワーク  
 Fig. 6 Network showing MF (34, 36) in team B pressing players in team A.

シーンでは指導者の戦況の解説は以下のとおりであった。「Aチームが主にボールを保持し、パスを回す時間が続いた。Bチームは特に34番や36番が前線から積極的にプレスをかけるが、Aチーム10番のパスを起点に空いたサイドのスペースから攻められて失点した」。対応する時間のネットワークを図6に示す。図6を見ると、Bチーム34番はBチーム→Aチームの次数が6で最も大きいことから、Bチームの中で他の選手より先行して動き、守備をしている戦況を表しているといえる。また、Aチームの方がチーム内での矢印が多いことも確認でき（Aチーム内平均次数：4.4、Bチーム内平均次数2.9）、チーム内での情報のやりとりが盛んであったことが分かる。さらに、Aチーム10番に向かう矢印が集中していることが示すように次数が10と最も大きい。このことからAチームの10番がパスを多く出していたかは判断できないが、プレスをかける選手やまわりの選手に合わせて動くことで、パスを受けやすくし、チームのプレーに積極的に関わっていることがうかがえる。

続いて、中盤のシーンに関する指導者の解説は以下のとおりであった。「Aチームの左サイド、Bチームの右サイドにおける攻防が激しい時間帯であった。Aチーム左サイド

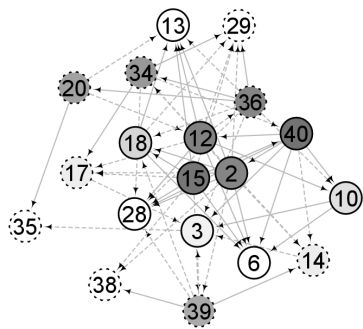


図 7 A チーム MF (15) に B チーム MF (38) がサイドで対応する場面のネットワーク

Fig. 7 Network showing defense of MF (38) in team B responding to offence of MF (15) in team A on the side of the court.

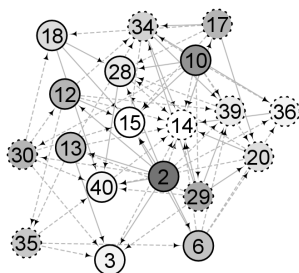


図 8 B チーム DF (20, 29) の動きに合わせて A チーム FW (40) がポジションをとる場面のネットワーク

Fig. 8 Network showing FW (15) in team A moving in response to DF (20, 29) in team B.

の 15 番の前のスペースにパスが出され、B チームのディフェンダー (DF) の 38 番が戻りながら守備に対応するという、カウンター攻撃に対して守備陣が対応するシーンが多くみられた」。対応する時間帯のネットワークを図 7 に示す。A チームの左サイドの攻撃的選手は 15 番で、対応する B チームの右サイドの選手は 38 番, 39 番であった。図 7 では同サイドの選手間で (15 番 → 38 番, 15 番 → 39 番) で矢印が接続されており、A チームの 15 番の動きに、B チームの同サイドの選手 (38 番, 39 番) が合わせて動いていたことが分かる。

最後に、終盤のシーンに関する指導者の解説は以下のとおりであった。「B チームが高い位置で DF ラインを維持してコントロールし、A チームが主に低い位置でボールを保持して、攻撃の隙を探る展開が続いた。B チームの DF (20 番, 29 番) のラインに合わせて動きながら、A チームのフォワード (FW) の 40 番がパスを受けるタイミングをうかがう場面や、さらに A チームの両サイドも裏を狙う動きが多くみられた」。対応する時間帯のネットワークを図 8 に示す。図 8 では、B チームの選手から、A チームの選手に多くのネットワークが出ていることが分かる (B → A の平均次数: 4.9, A → B の平均次数: 4.4, A → A の平均次数: 3.2, B → B の平均次数: 2.7)。特に、B チームの

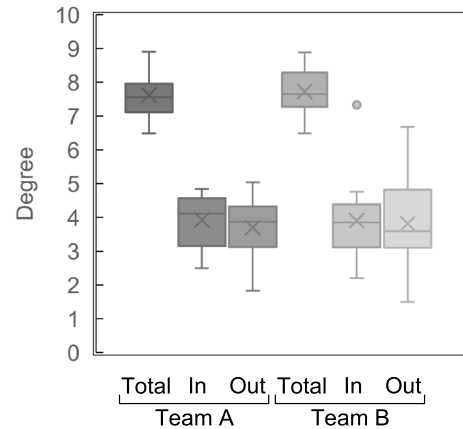


図 9 両チームの各選手の平均次数 (全体ネットワーク) の比較  
Fig. 9 Comparison of average degree (total network) of each player between both teams.

DF (20 番, 29 番) から A チームの FW の 40 番へと矢印がつながっており、B チームの DF が先に動いてポジションを調整し、その動きを見ながら A チームの選手が動いていることが分かる。

以上のように、指導者の主観評価である戦況と、同時時間のネットワーク図を比較した結果、戦況に関わる主な選手間の関係性が、ネットワーク上に反映されていることが確認できた。

#### 4.2 定量評価

提案手法による組織的パフォーマンスの定量化により、実際に指導者が意図するプレーを表すことが可能であるか確認するため、練習試合の映像を指導者が見て抽出したシーン (計 9 分) と他のシーンにおいて、代表的なネットワーク分析の指標である次数に統計的な差異が存在するか評価した。また、各評価のデータの分布を示す箱ひげ図では、最小値の下限は第 1 四分位点  $-1.5 \times$  四分位範囲、最大値の上限は第 3 四分位点  $+1.5 \times$  四分位範囲とし、上限・下限を超える値は外れ値とした。初めに両チームの特徴の違いなどを確認するため、図 9 に示す両チームの各選手の全シーンの平均次数を比較した。矢印の向きを考慮しない全次数、矢印が入る次数、矢印が出る次数すべてにおいて、両チームには有意差がなく、同等であることが確認された。また、図 10 ではそれぞれのチーム内のみのネットワークの次数を比較しているが有意差はなく同等であった。このことから、A チームが勝利したが、情報伝達のネットワークの特徴について、試合を通じての平均値では差異を見ることができない。また、両チームの選手は同じチームでトレーニングを行い、同じチーム方針の指導を受けていることもふまえ、プレーの特徴は比較的似ているとも考えられる。

次に、指導者が映像から組織的攻撃ができていないと判断したシーンとその他のシーンの違いを比較した。図 11 に、



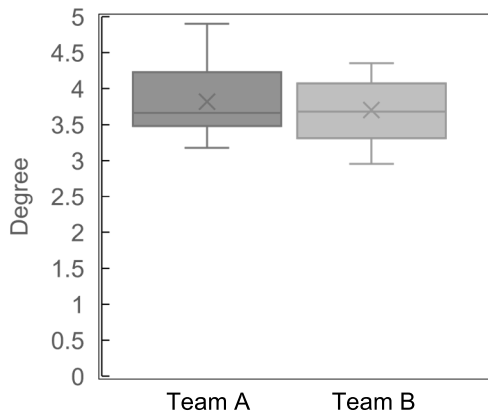


図 10 両チームの各選手の平均次数 (チーム内ネットワーク) の比較  
**Fig. 10** Comparison of average degree (team network) of each player between both teams.

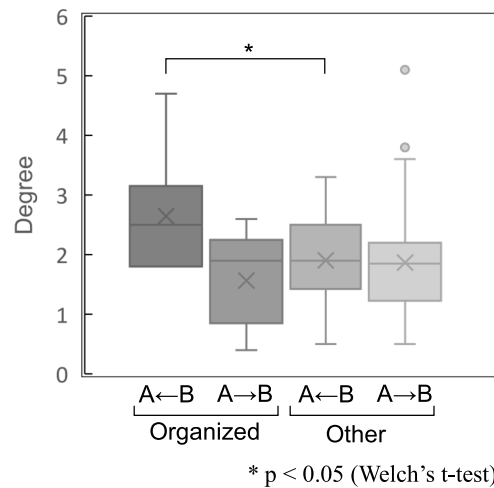


図 12 組織的攻撃シーンと他のシーンとの両チーム間の次数の比較  
**Fig. 12** Comparison of average degree from a team to the other team of each scene between organized scenes and the other scenes.  
 \*  $p < 0.05$  (Welch's t-test)

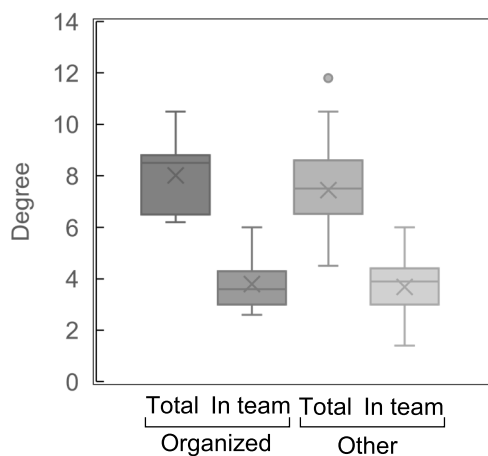


図 11 組織的攻撃シーンとその他の A チームの次数比較  
**Fig. 11** Comparison of average degree of each scene between organized scenes and the other scenes in team A.

それぞれのシーンにおける A チーム選手の全体ネットワークの平均次数と、A チーム選手のチーム内ネットワークの平均次数を示す。どちらの次数においても、両シーンに有意差は認められなかった。つまり、組織的攻撃ができていたシーンにおいても、情報伝達のネットワークの全体やチーム内の指標に優劣は見られなかったといえる。

チーム間の情報伝達の違いを評価するため、図 12 に両シーンにおける A チームから B チーム、B チームから A チームに分けた各選手の平均次数を比較した。比較の結果、B チームから A チームへの次数が、組織的攻撃ができていたシーンにおいて有意に高いことが認められた。つまり、対象チームで意図する組織的攻撃ができていたシーンを評価する指標として、相手チームから味方チームへの情報伝達を示すネットワークの次数が適用できることが示唆された。

## 5. 考察と議論

### 5.1 提案手法の妥当性および有用性について

本研究では、提案する移動エントロピーを用いた選手間の情報伝達の分析により、選手やチームの組織的パフォーマンスを可視化できるかを評価した。定性的評価では、指導者の目線で見えた戦況と分析結果であるネットワーク図を比較し、ネットワークの構造や選手間のグラフの結合によって、戦況に主に関わる選手同士の関係性を妥当に表していることを確認した。

従来、組織的パフォーマンスを評価する際には、サッカーではパスの成功本数やシュート本数などが一般的には用いられてきた。パスの詳細な評価を目的として映像からパスの方向や長さを抽出して分析する研究がなされている [21]。ボールを扱う競技では、パスが最も重要なチームプレーであるが、集団スポーツとしてはボールを保持する選手は 1 人のみであることから、パスの出し手と受け手以外の選手のほうが多数であり、パスをしていない選手がパスを生むための準備として事前の動きである“オフザボールの動き”が重要とされる [22]。また、その際には各選手が相手選手との位置関係を把握して確認して駆け引きを行い、パスを受ける動きのタイミングをはかっているといわれる。本研究の提案手法で示した情報伝達もオフザボールの動きを反映する解釈すると、オフザボールの動きの活発さを示す指標として、集団スポーツの指導や戦術立案に今後活用できる可能性がある。一方で、今回の手法では選手の位置や視野は計測しておらず、直接的に選手間に関わりがあったかを断定することはできないという制約がある。今後、GPS や地磁気センサなどで選手の位置や体の向きを計測することができれば、直接的な影響度合いを考慮した可視化も可能であると考えられる。

ネットワーク指標の定量評価においては、対象チーム（A チーム）が意図する組織的攻撃においては、全体の回数などに変化はないものの、相手チーム（B チーム）からの情報伝達が統計的に有意に多いことが確認できた。対象チームの意図する戦術は、攻撃側がなるべく相手にボールをとられないようにパスを回し、守備側の間をうかがうものである。つまり、パスを受ける選手は、相手の位置や動きに合わせて連動して動くことでチャンスを生み出していると見られる。これは、分析結果で相手チームからの情報伝達が多くなっているという結果に合致している。従来研究のサッカーの動作分析では、守備側の選手は攻撃側の動きやパスコースに反応し、ボールを奪っていることや、ボールを奪う際に特に反応した動きが増えるといわれている [23]。そのため、守備側がよくボールを奪うには、逆に攻撃側からの情報伝達が多いという結果が必要になると考えられる。この点において、守備の時間が長く続いたうえで負けた B チームは効果的にボールを奪う動きができていなかったととらえることができる。

今回の対象練習試合においては、A チームのボール保持時間が長く、分析結果を見る際に A チームの攻撃、B チームの守備として理解しやすくなっている。今後、より攻守が拮抗し、入れ替わりが激しい試合を評価するためには、別のネットワーク指標の検討に加え、ボールの保持率や選手の位置によるシーンの切り分け、時間区切りを可変にすることも検討していく必要がある。また、提案手法の移動エントロピーでは、2 選手間の動きの関係性の中で、直後の時間（固定幅の遅れ）への影響のみを考慮しているが、より時間が遅れた影響も含む移動エントロピー [24], [25] への拡張も必要と考える。

## 5.2 提案手法の実用に向けた検討

本研究の提案手法は、独立した加速度データどうしの関係性を分析するものであり、分析の演算処理としては、既存の計測システムへの実装が容易であると考えられる。現在、サッカーやラグビーなどのプロスポーツで最も普及している Catapult 社のデバイス [26] は、無線でリアルタイムに収集したデータや、有線接続でまとめて収集したデータをクラウドや PC 上で分析し、レポートして指導者や選手が見て確認するものである。提案手法で用いたデータは 1 秒間隔の加速度強度データであることから、無線と有線のいずれの通信でも実現できるデータ量であり、かつクラウドに計算や表示機能を加えるだけで実装することができ、親和性が高いといえる。また、可視化方法についても、ネットワーク図における選手の配置を GPS などで取得した実際の位置を反映させることや、走行距離などの既存指標を組み合わせることで、指導者がデータを理解しやすくなることができる。選手を示す丸の大きさや色などの表現についても、図 4 に示した 2 指標に限定する必要はなく、

たとえばネットワークをつなぐ経路として重要な選手を評価する目的で、媒介中心性などを用いることもできる。提案手法をシステム化した際には、PC やタブレットなどの表示画面上で着目したい指標を候補の中から選択し、色やノードの大きさなどの様々な表現方法を組み合わせることや、指標の数値をグラフ上に描画することで、ユーザの用途に応じた使い勝手を提供できる。

情報伝達を可視化したネットワーク図の実用については、3.1 節の定性評価と同様に、指導者の知識に基づいて抽出した場面を、より定量的かつ客観的に振り返って評価することに活用できる。さらに、指導者が抽出した場面のネットワークの情報をシステムで収集し、特徴をシステムが学習することにより、指導者が見逃していた類似場面の抽出に用いることも可能になると考えられる。

本研究では選手の動きの計測にリストバンド型デバイスを用いたが、プロスポーツなどで用いられている背中の体幹部に装着するデバイスでも、双方が全身運動の強度と相関する値であるため、同様の結果が得られると推測される。リストバンド型デバイスは多様なアスリートの運動計測に用いられており [27]、日常生活における睡眠や活動量の計測によりコンディション管理 [28] にも活用できるうえ、低価格で装着も簡便であることから、教育スポーツや育成年代のアスリートなどへの普及に、より適していると考えられる。一方で、競技ルールではリストバンド型機器の使用が現在認められていないため、公式戦では使用することができないという制約があり、本研究ではセンサを布製のバンドで保護したうえで、安全性に問題がないことを指導者や選手に確認したうえで使用した。リストバンド機器でカバーしていない公式戦については、別途ポケット付きのベストで背中にセンサを装着することで、競技ルールに則して計測することを検討している。将来的には、ウェアラブルデバイスに限定せず、映像解析による各選手の位置や動作の認識を活用し、非接触な計測によっても同様の分析が実現できると考えられる。

## 6. まとめ

本研究で提案した移動エントロピーを用いた潜在的情報伝達の分析指標の実験と評価により、以下の結論が得られた。サッカーチームの各選手が装着したウェアラブルデバイスの加速度データから移動エントロピーを算出し、ネットワークの構造を可視化した。抽出した複数シーンにおいて可視化したネットワークの構造は、チームの指導者の解説と矛盾なく妥当であることを確認した。さらに、指導者が抽出した意図する組織的攻撃ができているシーンでは、相手チームからの情報伝達が統計的に有意に大きくなっていることが確認でき、集団スポーツの組織的パフォーマンスを表す指標となりうることを示唆された。この結果、提案手法の導入により、現場の指導者がトレーニング中の選手



の動きの関係性を定量的かつ客観的に把握しやすくなると期待される。長期的なデータを収集することで、将来的にはトレーニングの効果や選手の成長などの変化をデータに基づいて把握できるシステムにつなげていきたい。また、提案手法はプロスポーツなどで普及しているウェアラブルデバイスや分析システムへの実装が容易であり、今後はより多くのチームでの活用を目指し、計算ロジックのチューニングやネットワーク指標の拡充、各指標の意味の裏付けを進めていく。

**謝辞** 本研究に協力いただいたサッカーチームの指導者、選手の皆様に謹んで感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] Wehbe, G., Gabbett, T., Dwyer, D., McLellan, C. and Coad, S.: Monitoring neuromuscular fatigue in team-sport athletes using a cycle-ergometer test, *International Journal of Sports Physiology and Performance*, Vol.10, No.3, pp.292-297 (2015).
- [2] Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J.C., Bourdon, P.C., Voss, S.C., Hocking, J. and Coutts, A.J.: Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol.16, No.6, pp.550-555 (2013).
- [3] 井上尚武, 杉山豊人: サッカーにおけるチームづくりとゲームパフォーマンスに関する研究, *スポーツパフォーマンス研究 1*, pp.162-168 (2009).
- [4] 大江淳悟, 上田 毅, 沖原 謙, 磨井祥夫: サッカーにおけるゲームパフォーマンスの客観的評価, *体育学研究*, Vol.58, No.2, pp.731-736 (2013).
- [5] Malone, S., Owen, A., Mendes, B., Hughes, B., Collins, K. and Gabbett, T.J.: High-speed running and sprinting as an injury risk factor in soccer: Can well-developed physical qualities reduce the risk?, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol.21, No.3, pp.257-262 (2018).
- [6] Gabbett, T.J.: The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder?, *Br. J. Sports Med.*, Vol.50, No.5, pp.273-280 (2016).
- [7] Duarte, R., Araújo, D., Freire, L., Folgado, H., Fernandes, O. and Davids, K.: Intra-and inter-group coordination patterns reveal collective behaviors of football players near the scoring zone, *Human Movement Science*, Vol.31, No.6, pp.1639-1651 (2012).
- [8] Yokoyama, K., Shima, H., Fujii, K., Tabuchi, N. and Yamamoto, Y.: Social forces for team coordination in ball possession game, *Physical Review E*, Vol.97, No.2, 022410 (2018).
- [9] Nevett, M., Rovegno, I., Babiarz, M. and McCaughy, N.: Changes in Basic Tactics and Motor Skills in an Invasion-Type Game after a 12-Lesson Unit of Instruction, *Journal of Teaching in Physical Education*, Vol.20, No.4, pp.352-369 (2012).
- [10] Mitchell, S., Oslin, J. and Griffin, L.: *Teaching Sport Concepts and Skills: A Tactical Games Approach (2nd ed.)*, Human Kinetics Publishers (UK) Ltd. (2016).
- [11] Memmert, D. and Roth, K.: The effects of non-specific and specific concepts on tactical creativity in team ball sports, *Journal of Sport Science*, Vol.25, pp.1423-1432 (2007).
- [12] 北野勝則: Transfer entropy を用いた神経回路の解析, *Annual Review 神経*, 中外医学社, pp.1-5 (2017).
- [13] 日高昇平: 人の多感覚コミュニケーションにおける情報ネットワークの可視化, *電子情報通信学会誌*, Vol.96, No.12, pp.945-950 (2013).
- [14] 天神雄貴, 尾崎知伸: 移動エン트로ピーによる動的ネットワークを用いた SNS と商品購買の相互関係の分析, *人工知能学会研究会*, pp.13-17 (2015).
- [15] 住岡英信, 吉川雄一郎, 浅田 稔: 移動エン트로ピーによる因果関係の発見とこれに基づく共同注意の獲得, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集*, 1A2-L08 (2017).
- [16] 小村和輝, 鳥海不二夫, 大橋弘忠: 移動エン트로ピーを用いた銘柄間影響度ネットワークによる投資指標の分析, *人工知能学会金融情報研究会*, pp.1-6 (2014).
- [17] Sasaki, S., Ukawa, S., Okada, E., Wenjing, Z., Kishi, T., Sakamoto, A. and Tamakoshi, A.: Comparison of a new wrist-worn accelerometer with a commonly used triaxial accelerometer under free-living conditions, *BMC Research Notes*, Vol.11, No.1, pp.1-5 (2018).
- [18] Ishii, H., Tempo, R. and Bai, E.W.: A web aggregation approach for distributed randomized PageRank algorithms, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.57, No.11, pp.2703-2717 (2012).
- [19] Akhtar, N.: Social network analysis tools, *4th International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, Vol.9, pp.388-392, IEEE (2014).
- [20] 田村達也, 堀野博幸, 土屋 純: サッカーにおけるボール奪取後の攻撃の分類方法の提案と検討—2012年 UEFA ヨーロッパ選手権における速攻とポゼッション攻撃に注目して, *スポーツ科学研究*, Vol.12, pp.48-55 (2015).
- [21] 佐藤祐亮, 山中 亮, 大塚 寛: サッカーの攻守推移のモデルからのパスの抽出, *情報科学技術フォーラム講演論文集*, Vol.14, No.1, pp.145-148 (2015).
- [22] 曾根純也: サッカーにおけるパス受け手の身体知促発指導に関する発生運動学的考察, *スポーツ運動学研究*, Vol.30, pp.30-48 (2018).
- [23] 関根和生, 高梨克也: サッカーにおける守備側選手が攻撃側選手との時間的と空間的ズレを埋めるための手がかかり, *認知科学*, Vol.19, No.2, pp.244-248 (2012).
- [24] Ito, S., Hansen, M.E., Heiland, R., Lumsdaine, A., Litke, A.M. and Beggs, J.M.: Extending transfer entropy improves identification of effective connectivity in a spiking cortical network model, *PloS One*, Vol.6, No.11, e27431 (2011).
- [25] Itoda, K., Watanabe, N. and Takefuji, Y.: Model-based behavioral causality analysis of handball with delayed transfer entropy, *Procedia Computer Science*, Vol.71, pp.85-91 (2015).
- [26] カタパルト社: ウェアラブル・テクノロジー, 入手先 (<https://www.catapultsports.com/jp/>).
- [27] Seshadri, D.R., Li, R.T., Voos, J.E., Rowbottom, J.R., Alfes, C.M., Zorman, C.A. and Drummond, C.K.: Wearable sensors for monitoring the internal and external workload of the athlete, *NPJ Digital Medicine*, Vol.2, No.1, pp.1-18 (2019).
- [28] 加納樹里: 身体活動計による日中活動量と夜間睡眠評価, *体育研究*, Vol.46, pp.15-22 (2012).



田中 毅 (正会員)

2005年北海道大学大学院情報科学研究科修士課程修了，同年株式会社日立製作所に入社，現在，同社研究開発グループに所属。センサネットワーク，ウェアラブルデバイス，生体計測，行動認識の研究開発に従事し，センサを

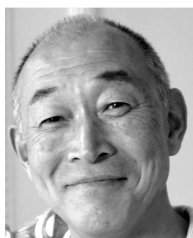
活用したスポーツ科学の研究を進める。



馬込 卓弥

2014年大阪大学大学院連合小児発達学研究科博士課程修了。同年大阪大学大学院医学系研究科分子精神神経学(大日本住友製薬)寄附講座助教，同大学院神経細胞生物学(第一解剖)講座助教。2015年同大学院健康スポーツ科学(スポーツ医学)講座助教。2018年より追手門学院

大学社会学部准教授，大阪大学大学院医学系研究科スポーツ医学招聘准教授。スポーツ庁委託事業であるスポーツ研究イノベーション拠点形成プロジェクト(SRIP)に従事し，「パフォーマンス解析」担当としてアスリートを支援。



田附 俊一

1986年筑波大学大学院体育研究科コーチ学専攻修了。1994年同志社大学文学部社会学科助教，2001年同教授，2005年同社会学部教育文化学科教授，2008年より同スポーツ健康科学部教授。1998～1999年ドイツ・マインツ

大学スポーツ学部客員研究員，2019～2020年ドイツ・ミュンスター大学心理学・スポーツ科学部スポーツ科学研究所客員教授。遊び・運動・スポーツとコミュニケーションの研究に従事。



合田 徳夫

1997年東京大学大学院数理科学研究科博士課程修了。同年株式会社日立製作所に入社，現在，同社公共システム事業部デジタルソリューション推進部に所属。2005～2012年北海道大学情報基盤センター客員研究員，2012～

2017年慶應義塾大学医学部特任助教，2018～2020年慶應義塾大学医学部特任講師。様々な分野の集団データ分析ソリューションに従事。