

博士学位論文

サッカーにおけるトランジションの  
評価のための位置情報解析

2024年3月

村井聡紀

岡山県立大学大学院  
情報系工学研究科

# サッカーにおけるトランジションの評価のための位置情報解析

## 目 次

### 第1章 緒言

1.1	サッカーにおける位置情報取得システム	1
1.1.1	サッカーにおける位置情報取得システムの歴史	
1.1.2	サッカーにおける位置情報取得システムの現在	
1.1.3	サッカーにおける位置情報取得システム	
	(ア) 映像分析による位置情報取得システムの計測方法と精度	
	(イ) GPSによる位置情報取得システムの計測方法と精度	
	(ウ) 我が国での普及の実際	
1.2	サッカーにおける位置情報取得システムと試合での成否	8
1.2.1	現代サッカーにおける研究課題	
1.2.2	サッカーにおける位置情報取得システムを用いた研究成果	
1.2.3	サッカーにおけるトランジションの評価のための位置情報解析に関する研究成果	
1.3	サッカーにおけるトランジションの評価のための位置情報解析に関する研究課題	15
1.4	本研究の目的と本論文の構成	17

### 第2章 プレー局面とプレーエリアで区分したチーム凸面積の解析

2.1	研究方法	19
2.1.1	解析対象	
2.1.2	解析方法	
2.1.3	統計処理	
2.2	結果	21

### 第3章 トランジションを成立させるためのボール奪取時の位置情報解析

3.1	研究方法	24
3.1.1	解析対象	
3.1.2	解析方法	
3.1.3	統計処理	

3.2 結果	28
3.2.1 時間区分と局面区分での位置情報指標	
3.2.2 トランジションの成立・不成立でのボール奪取時の位置情報指標	
第4章 トランジションを成立させるための守備最終局面の位置情報解析	
4.1 研究方法	31
4.1.1 解析対象	
4.1.2 解析方法	
4.1.3 統計処理	
4.2 結果	32
4.2.1 3秒前, 2秒前, 1秒前およびボール奪取時の位置情報指標	
4.2.2 ボール奪取時と3秒前, 2秒前, 1秒前の位置情報指標値との変化量	
第5章 結論	
5.1 本研究の結果のまとめ	39
5.2 本研究の結果の妥当性	40
5.3 本研究の結果の新規性	43
5.4 効率的なトランジションに関する考察	45
5.5 本研究の限界と課題	45
5.6 今後の展望	46
参考文献	47
謝辞	56
本論文に関する研究業績	57

## 第1章

### 緒言

#### 1.1 サッカーにおける位置情報取得システム

##### 1.1.1 サッカーにおける位置情報取得システムの歴史

サッカーの位置情報取得システムは、現代サッカーの戦術分析に欠かせないものである。サッカーの位置情報による戦術分析は、選手のパフォーマンスを可視化する手段として長年にわたって取り組まれてきた。コンピュータさえ開発されていない時代の最初のアプローチは、ペンと紙を使用した筆記法であった。筆記法は、試合を構造化して文書化するためのガイドとして考えられ、特定の記号と文法を使用した方法である (Reep & Benjamin, 1968; 大橋二郎ほか, 1980; 大橋二郎ほか, 1983)。大橋らは、1名の選手を2名の測定者で担当し、観客席などの高所から選手の動きを競技場の縮図に描かれた用紙に書き込み、記録用紙を5分毎に測定者の交代とともに交換した。データ処理にはキルビメーターを用いて計測し、移動距離を算出し、それらをもとに選手の移動軌跡をトレースし、移動図を作成し分析した (大橋二郎ほか, 1980; 大橋二郎ほか, 1983)。また、大橋らは、三角測量法の原理を応用した測定方法を用いて、競技場のタッチライン外側に沿った2カ所の照準器から、対象とする選手を追従し、照準器に装着されたポテンションメータから角度変化を求め、試合中の連続した移動軌跡と座標間距離を算出した (大橋二郎ほか, 1987)。大橋らは、これらの方法により、ポジション毎の移動距離や時間経過に伴う移動距離の変動、移動速度による分析を可能にした (大橋二郎ほか, 1980; 大橋二郎ほか, 1983; 大橋二郎ほか, 1987)。

1980年代後半から1990年代前半にかけて、情報技術の進歩によって、コンピュータを用いた位置情報による戦術分析が行われるようになった (Van Gool et al., 1988; 河合一武ほか, 1992; 河合一武ほか, 1993; 瀧剛志, 長谷川純一, 1999)。Van Gool et al.は、パイロット的な研究として、サッカーの試合中に高層ビルからフィルムカメラでピッチ全体を撮影し、映像から画像をデジタル化し、フロッピーディスクへ保存することで、史上初の位置情報データを抽出した (Van Gool et al., 1988)。それらのデータから選手の身体的パフォーマンスを調査し、選手らが試合平均10.2 kmの総走行距離の中での身体強度と心拍数や酸素摂取量との相関を確認した (Van Gool et al., 1988)。また、河合らは、三角測量法の原理を応用した測定方法の検討を加え、コンピュータを用いたデータ処理システムの開発により実

用化に取り組んだ（河合一武ほか，1992；河合一武ほか，1993）。この頃から世界的にも商業化が進み，フランスのAmisco社は，1996年に世界初のサーマルカメラを使用した商業用の位置情報取得システムを開発した。また，同時期に英国のProzone社は，Amisco社と同様のシステムを開発し，市場に参入した。2011年に両社は合併し，長年にわたって，ヨーロッパのトップリーグに位置情報取得システムを提供し続けている。

当時の画像処理技術の顕著な発展は，現在のサッカーの位置情報による戦術分析に非常に大きな影響を与えた。瀧と長谷川は，コンピュータを用いたチームワークの定量的評価方法を検討した（瀧剛志，長谷川純一，1999）。複数台のカメラをフィールドのタッチライン沿いに配置し，フィールド全体を分割撮影した映像を用いて，選手およびボールの移動を半自動的に追跡する方法を提案した。それらで取得された位置情報から優勢領域と呼ぶ一種の動的な範囲を用いて，チームワークを定量的に評価できることを示した（瀧剛志，長谷川純一，1999）。沖原らは，3次元画像解析法（Direct Linear Transformation Method；以下，DLT法とする）による複数のカメラの視点を組み合わせ，個々の選手の位置情報を抽出可能にした（沖原謙ほか，2001；Okihara et al., 2003）。さらに，大江らは，試合中の選手の位置情報を映像からリアルタイムで取得し，数理モデルを用いたコンピュータによる分析支援の自動化に取り組んだ（大江淳悟ほか，2007）。

その後，サーマルカメラからHDカメラに切り替わった従来の光学式の位置情報取得システムに加えて，Global Navigation Satellite System（以下，GNSSとする）デバイスによる位置情報取得技術が確立されてきた。この技術は，軍事研究としてのレーダー工学に基づく追跡技術が使用されている。衛星を利用して動作するGNSSデバイスは，米国国防省が開発した衛星システム Global Positioning System（以下，GPSとする）と通信することで位置情報を取得する。当時は軍事用途に限定されていたが，2000年以降にこの処置が解除され，スポーツでの使用も認められた。また，2015年に国際サッカー評議会（International Football Association Board；以下，IFABとする）が公式試合でのウェアラブルデバイスの使用を承認し，国際サッカー連盟（Fédération Internationale de Football Association；以下，FIFAとする）が無線技術の使用を許可するために規則を改正した。このことから，GPSデバイスによる位置情報取得システムを用いた研究は，2014年以降に急激に増加していることが報告されている（Rico-González et al., 2020）。GPSデバイスは，時系列的に小型化が進み，かつシステムの導入費用が光学式の位置情報取得システムと比較して，大幅に削減されたこと

で加速的に普及した。また、GPSデバイスの利点は、センサー技術によってGPSデバイスに心拍データや呼吸データを統合できる点である。さらに、GPSデバイスは、屋外であれば使用環境に左右されず、練習中のデータを測定できる点も利点である。これらの背景から、サッカーの位置情報に基づいた当初の研究は、選手の身体的パフォーマンスに着目したものであった (Valter et al., 2006; Rampinini et al., 2007;; Carling et al., 2008; Di Salvo et al., 2010; Buchheit et al., 2014) 。これらの研究成果から、疲労を原因とする怪我を防ぐための身体活動負荷の評価が可能となった (Dellal et al., 2015; Fernández et al., 2016; Buchheit & Simpson, 2017; Vallance et al., 2020) 。

サッカーの位置情報取得システムの歴史は、筆記法に始まり、コンピュータ処理が可能となり、光学式システムによる半自動追跡システムが開発された。また、スポーツ現場でのGPSの使用が認められ、GPSシステムの利点を活かした選手の身体的パフォーマンスの研究が進められてきた。

### 1.1.2 サッカーにおける位置情報取得システムの現在

FIFAは電子パフォーマンス・トラッキングシステム (Electronic Performance and Tracking Systems: 以下, EPTSとする) の部門を創設した (FIFA, 2023) 。EPTSは、3つの異なる位置情報取得システムが存在する。それらは、画像処理技術に基づく光学式システム、GPSシステム、レーザーとマイクロ波技術に基づくシステム (Local Positioning System; 以下, LPSとする) に3分類される。これまでの研究手法として、光学式システムは、サッカーの戦術的行動を対象とした研究論文の60%で使用されており、GPSとLPSは、それぞれ33%と7%の研究論文で使用されていた (Rico-González et al., 2020) 。FIFAは、2018年のW杯ロシア大会で、新たなEPTSとして、米国のChyronHego社が開発した光学式システムであるTRACAB®を採用した。TRACAB®は、撮影映像を機械的に解析し、走行速度や距離、パスやシュートの軌道や本数、反則の有無等のデータをリアルタイムで測定していくものである。FIFAは、試合分析の支援として、各出場国に2台のタブレット端末を提供した。各出場国は、1台をピッチサイドにいる監督やベンチスタッフが、もう1台をスタンドから試合を分析しているデータアナリストが使用した。タブレット端末は、試合中にリアルタイムで更新されるFIFAが集計するEPTSの試合データを確認でき、データアナリストは、タブレット上でデータを分析し、グラフ化等の可視化処理を行い、それをピッチサイドのもう1台に

送信することで、試合采配の判断材料を提供した。このように、今日のサッカーの位置情報取得システムは、チームやグループ、選手個々の戦術的・身体的パフォーマンスの評価に欠かせないツールである。

### 1.1.3 サッカーにおける位置情報取得システム

#### (ア) 映像分析による位置情報取得システムの計測方法と精度

Jリーグをはじめ、ブンデスリーガ、リーガエスパニョーラ、プレミアリーグなどの世界のトップリーグで、試合中に選手やボールの位置情報を収集するために、光学式トラッキングシステムを採用している (Buchheit & Simpson, 2017)。試合を撮影するカメラは、複数固定されており、それぞれのカメラの撮影範囲を合成し、撮影エリア全体をカバーするようになっている。また、それぞれのカメラのキャリブレーションを行い、2次元画像の再構成を行い、カメラを較正するために、各カメラはフィールド内の距離がわかっている点の情報を持つ (Rico-González et al., 2020)。次に、すべての光学式トラッキングシステムは、画像処理技術または光学的手法によるアルゴリズムを構築し、角度情報を表す画像座標を測定および到来角による三角測量に基づき、直交座標系を介して情報を得る。光学式トラッキングシステムの最大の利点は、機器による物理的な介入なしに、選手とボールの両方を同時に追跡できる唯一の非侵入型であることである。また、このシステムは映像からデータを復元できるため、デバイスの故障によるデータの損失がないことも利点の一つである。

光学式トラッキングシステムであるProzone®システムの精度を評価した研究では、異なる速度や様々な方向へのランニングを実行し、Prozone®システムの測定値と基準値の速度を比較検証した。基準値は、各走行の開始地点と終了地点に設置したタイミングゲート (Newtest 300 Series Power Timer, Newtest Oy, Finland) から各走行の時間と速度を測定した。その結果、50 m および 60 m のペース走中に Prozone®システムによって測定された平均速度は、タイミングゲートによって測定された平均速度と優れた相関関係 ( $r = 0.999$ ) を示した。また、最大15 mのスプリント中の平均速度も優れた相関関係 ( $r = 0.970$ ) を示し、左右の方向転換を伴う最大20 mのスプリント中の平均速度も優れた相関関係 ( $r = 0.960$ ) を示した (Valter et al., 2006)。

TRACAB®システムの精度を評価した研究では、2つの光学式トラッキングシステムのサッカーに特化した測定精度を比較検証した。一つ目が「Gen4」システムで、フィールド片

側1か所に設置された2つのマルチカメラユニットで構成されている。もう一方は、分散型の「Gen5」システムで、フィールド両側に設置された4つに加えて、ゴールの後方に設置された2つの単眼型を組み合わせたものである。システムの精度を評価するために、基準となるシステム（<sup>©</sup>VICON Motion Systems, Oxford Metrics, UK）で同時に記録された計測値と比較した。その結果、基準となるシステムと比較して、Gen5はGen4よりも位置計測の精度がわずかに優れていた。瞬間的な速度と加速度の測定における精度の差は有意であったが、効果の大きさからすると些細なものである。総移動距離については、Gen4 ( $0.42 \pm 0.60\%$ )、Gen5 ( $0.27 \pm 0.35\%$ ) とともに、基準と比較して些細な偏差を示した。Gen5の分散型は、Gen4の単眼型と比較して、精度の面でわずかなメリットしかないことを示唆している (Linke et al., 2020)。

#### (イ) GPSによる位置情報取得システムの計測方法と精度

GPSは、既知の測位システム（衛星）を基準とし、高周波を介して位置が不明な物体を算出するものである。GPSは米国の衛星航法ネットワークを使用しており、屋外での有用かつ有効なデータを得るためには、最低でも24機の衛星が必要である (Shen et al., 2019)。選手の位置を計算するために、衛星とGPS受信機は高精度に同期した原子時計を搭載する必要がある。まず、衛星が光の速さで信号を送信し、信号が出発した瞬間を示すことにより、GPS受信機は信号が到着するまでの時間を判断し、対応する値に速度を乗じる。GPSは、選手の位置の計算に三角測量が採用されている (Treviño, 2014)。距離として、半径を知ることによって、球体が成立し、選手の位置は、円／球のどの点においても地表に反映させることができる。その上で2つ目の円が計算されると、その位置は、地球上で2つの球が交差する2つのポイントのうちの1つになる。より正確なデータを得るためには、少なくとも4つの衛星までの距離を計算することにより、GPS受信機の緯度、経度、高度に関する正確な情報を生成する (Larsson, P., 2003)。このような原理で、選手の背中に設置されたGPS受信機は、選手の位置をピンポイントで特定することができる (Cummins et al., 2013; Malone et al., 2017; Jackson et al., 2018)。GPSの課題は、位置情報の取得に必要な衛星が常に見えるわけではないため、広いスタジアムでは精度が落ちることである (Linke, et al., 2020)。

GPSの精度および信頼性については、多くの先行研究で担保されている (Edgecomb and Norton, 2006; Coutts and Duffield, 2010; Jennings et al., 2010; Buchheit et al., 2014)。Vickery

et al.は、2名の被験者に対して、サッカーのスポーツの典型的な動きを再現したドリルを3種類のGPS（サンプリング周波数：5 Hz, 10 Hz, 15 Hz）による計測データとビデオベースシステムによる計測データを比較した（Vickery et al., 2014）。被験者の距離と速度の基準値は、22台のカメラを搭載した英国のVicon社の動作解析システム（©VICON Motion Systems, Oxford Metrics, UK）を用いて、サンプリング周波数100 Hzで取得した。その結果、GPSを用いて測定した距離と速度は、VICONのデータと有意な差はなかった（ $p > 0.05$ ）。GPSのサンプリング周波数の違いについては、精度の向上は見られなかった。中でも、緩やかな方向転換を必要とする40 mのランニングコースでの計測において、10 HzのGPSで計測した距離は、基準値と有意な差がないことを明らかにした（Vickery et al., 2014）。また、チームスポーツの模擬サーキットを使用した研究成果では、10 HzのGPSの計測値と基準値との総距離に有意な差はなかったことから、様々な速度や距離を走る模擬サーキットでの距離を有効に測定できることを示唆している（Scott, M. T. & Kelly, V. G., 2016）。

それぞれの位置情報取得システム間の有効性と信頼性を調査した研究がいくつか存在する。チームスポーツにおける走行距離とスプリントの力学的特性を測定するため、GPS（サンプリング周波数：10 Hz, 18 Hz）とLPS（サンプリング周波数：20 Hz）を比較した研究では、6名の男性アスリートを対象に、屋外でチームスポーツに特化したサーキットを10回走行させた。サーキットには、ウォーキング、ジョギング、スプリントの各セクションが含まれ、直線または方向転換しながら行われた。妥当性は、測定値と基準値をTEE (typical error of estimate) で比較することで判断し、信頼性は、各技術の2つの装置をCV (coefficient of variation) で比較することで検討した。その結果、GPS (18 Hz) はGPS (10 Hz) に比べてチームスポーツの動作パターンを判定する上での有効性と信頼性が向上し、LPS (20 Hz) は全体的に有効性と信頼性に優れていることが示された。しかし、GPS (10 Hz) と比較して、GPS (18 Hz) とLPS (20 Hz) は測定誤差による外れ値が多く、現時点では実用化には限界があると示唆した（Hoppe et al., 2018）。

3つのトラッキングシステムであるビデオベースシステム(VID) (SportVU, STATS, UK), LPS (Inmotio Object Tracking BV, Inmotio, Netherlands), GPS (SPI Pro X, GPSports, Australia) の測定精度を評価した研究では、各取得システムの位置、速度、加速度、距離の測定値を同時に記録された基準システム（©Vicon Motion Systems, Oxford Metrics, UK）の測定値と比較され、二乗平均平方根誤差（RMSE）によって定量化された。検査項目は、屋

外サッカー場であらかじめ定義されたトラックでのテストラン、シャトルラン、スモールサイドゲームで行われた。基本的な時空間トラッキングデータの有効性は、テストしたすべての技術で大きく異なっていた。特に、LPSは、VIDやGPSに比べて、選手の位置を測定する際に高い有効性を示した。瞬間的な速度計測の誤差については、GPSとLPSがVIDよりも有意に低い誤差を達成し、瞬間的な加速度の値についても同等の精度差が見られた。スモールサイドゲームでは、GPSは、総距離のカテゴリーで基準値からの乖離が最も小さく、誤差はGPS (2.2%)、VID (2.7%)、LPS (4.0%)であった。すべての取得システムに共通しているのは、追跡対象物の速度が速くなるほど誤差の大きさが大きくなった。特に、高速走行時の走行距離など、実用上の判断に大きな影響を与える可能性のある性能指標では、各技術とも基準システムからの偏差が40%を超えていた。以上の結果から、トラッキングデータの有効性はシステム間で大きく異なることが明らかになり、異なるトラッキング技術を用いた結果を比較する場合には注意が必要であることを示唆した (Linke et al., 2018)。

10 HzのGPSデバイス (Vector®, Catapult Sports, Melbourne, Australia) と2つの光学式トラッキングシステム ((TRACAB®, Chyronhego, New York, USA) および (Second Spectrum®, Los Angeles, USA)) の間の互換性を評価した研究では、イングランドプレミアリーグに参戦している30名の選手が、5試合にわたって3種類のトラッキングシステムを使用してモニターされた。システム間の互換性を判断するために、選手の運動変数 (総走行距離、高速走行距離 (19.8~25.2 km/h) )、スプリント走行距離 (25.2 km/h以上)、19.8 km/h以上の努力最大速度) を比較した。さらに、光学式システムのデータとソフトウェア (Openfield, Catapult Sports, Melbourne, Australia) でフィルタリングされたデータとの間の一致度も評価した。その結果、すべての変数において、3つのトラッキングデバイス間で差異が見られた。具体的には、総走行距離と最高速度を除き、すべての変数でTRACAB®が最も高い値を示し、次いでSecond Spectrum®, Vector®の順であった (Ellens et al., 2021)。

#### (ウ) 我が国での普及の実際

Jリーグ、(株)、データスタジアム(株)との共同でJ1リーグへの位置情報取得システムの導入が推進されている (後藤, 2022)。まず、映像に関する取り組みとして、Jリーグの過去26年間すべての試合は、俯瞰映像で撮影され、それをスカウティング映像という形で各クラブの強化担当者に提供されてきた。そのスカウティング映像は、各クラブの分析担当へ自

クラブ、次に対戦するクラブ、他のクラブを含めて分析を進めていくための試合映像である。スカウティング映像はこれまで、試合後に提供されていた。現在の新しいアプローチは、このスカウティング映像を試合中にリアルタイムで見られるシステムである。この分析ツールLIVE SCOUTERは、(株)Jリーグメディアプロモーション、NTTグループ(株)、データスタジアム(株)が共同で開発した。主に分析担当がいるスタジアム内の記者席、そして監督やコーチがいるベンチ周辺に通信環境を設置し、スカウティング映像と詳細データのリアルタイム配信と通信環境をJ1クラブに提供している。

GPSの使用は、日本サッカー協会(以下、JFAとする)の取り組みが中心となり、Jリーグのクラブでの使用はもちろんのこと、大学や高校生などの育成年代にも普及している。現在、JFAは、世界で戦えるフィジカルの構築、個人の特性にあったフィジカル要素の向上を達成するために、フィジカルフィットネスプロジェクトを実施している。具体的には選手のパフォーマンスを、心理的・社会的側面、戦術的側面、技術的側面、そして体力的側面からなる4つの側面からとらえ、このプロジェクトは、体力的側面に特化してアプローチしている。さらに、体力的側面を持久的、高強度運動、スプリント、筋発揮に分類し、それぞれを向上させることを目指している。特に、このプロジェクトは、ユース育成、指導者養成の2つの側面にアプローチしている取り組みである。この体力的側面を定量的に測るために、GPSが活用されている。さらに、これらのA代表を含む、各年代のカテゴリーのGPSデータは、web上で公開されている。Jリーグの数クラブでも同様でのデータを公開している。また、育成年代では、2019年度の全国高校選手権の出場48チーム中18チームに導入され、2022年では全国で約250の高校で使用されている。また、GPSデータは、2022年の全日本大学選抜の選手選考にも正式に使用されている。

## 1.2 サッカーにおける位置情報取得システムと試合での成否

### 1.2.1 現代サッカーにおける研究課題

現代サッカーは、選手の能力の最大化を測るために戦術が高度化しており、位置情報は、試合の勝敗や得失点に関連する分析に対して重要な役割を持つ。その背景として、技術革新によって位置情報の取得が可能となり、フィジカルパフォーマンス (Valter et al., 2006; Rampinini et al., 2007; Carling et al., 2008; Di Salvo et al., 2010; Buchheit et al., 2014) だけでなく、戦術面でのパフォーマンスの可視化が可能になってきたことが挙げられる (Beetz

et al., 2009; Grunz et al., 2012) . つまり、研究による客観的なデータを示し、スポーツ科学とコーチングの相互作用を高めることが重要な課題として考えられる。

サッカーは、ゲーム経過に伴って刻々と変化する状況に適したプレーを選手自身の判断に基づいて実行していくことから、選手の能力やチーム力の評価は監督やコーチの主観的評価に依存することが多い。専門家の視認的方法による試合分析では、技能、戦術、チーム力などが質的に評価され、記述される（山中邦夫ほか, 1985）. この方法では、試合中に発現する具体例に基づいて、攻撃・守備における注意点、修正点を指摘することにより、試合を専門的に総合評価できるものの、分析者の主観性および恣意性を排除することはできない。また、コーチの試合観察の正確性は3割程度と低く、集団競技におけるゲームパフォーマンスの評価は容易ではない。このような問題点を克服するため、集団競技でも選手の能力やチーム力をトラッキングデータで客観的、数量的に評価しようとする試みがなされており、試合中で起こる様々な事柄を数値化することの重要性が増している（McGarry et al., 2002; Guillaume et al., 2020; Chacoma et al., 2021） .

大江らは、DLT法を用いサッカーの試合中の攻撃局面でのシュートに結びつく攻撃の要因を数量的に評価・検討した。独自のチーム戦術評価法により測定した結果、因子分析によってそれらの測定項目の信頼性と妥当性を確認した。その因子分析から算出された因子得点を用いたクラスター分析の結果、つくり局面は6つ、しかけ局面は11つ、くずし局面は4つに分類された。この結果は、各局面における攻撃パターンの特徴を示す因子得点の効果の大きさ（ES）及び成功率から、局面突破に有効な攻撃パターンを序列化できることを示唆した（大江淳悟ほか, 2007, 大江淳悟ほか, 2012） .

これらの他にも、選手の位置情報から選手間の連動性の数値化の研究も進められてきた（Duarte et al., 2013） . 試合中の空間的な評価研究では、我が国での先進的な取り組みとして、サッカーの試合映像に基づく集団行動の定量的評価を行うために、集団の動きの中で作られる各個人の勢力範囲に着目し、それを優勢領域と呼ぶ特徴量で定式化した研究が報告されている（松本貴之ほか, 1997; 瀧剛志, 長谷川純一, 1998; 藤村光, 杉原厚吉, 2004） . また、フォーメーションに基づく組織的なプレーに着目した研究では、特定の選手間のユークリッド距離による引力斥力モデルとフォーメーションマップを採用し、試合状況に応じてフォーメーションの移動や変更をシミュレーションできることを示した。さらに、選手の行動を魅力度に基づく行動モデルに従うと仮定し、選手の位置情報からチームの集団行動

の特徴量の可視化によって定量的に評価した研究もある。このモデルは、人間は心理的な刺激を受けて行動していると仮定して、その刺激が行動に与える影響をモデル化するものである。その結果、集団の中で各選手が他の選手に与える影響度は、数値として客観的に評価でき、魅力度に対応するポテンシャル場の可視化は、特定の選手に働く心理的な影響の分布によって評価できることが報告されている。

海外では、スモールサイドゲームを対象とした研究で、Frencken et al.はチームの面積と重心位置が試合レベルの攻撃と守備の状況を示す集合的な変数として扱うことができると仮定し、全体的なゲームパターンを特定した (Frencken et al., 2011)。その結果、チーム重心位置は、試合全体を通じて、自チームと対戦チーム間で強い正の線形関係を示し、長軸方向は特に強い相関があった ( $r=0.94$ )。また、19得点のうち10得点は長軸方向でのチーム重心位置の交差が確認された。チームの凸面積は、自チームと対戦チーム間で線形関係が認められなかったが、これらの変数は、チームレベルでのサッカーの攻撃と守備のダイナミクスを捉える集団変数の基礎を提供する可能性があること示唆している。また、Bartlett et al.は攻撃での対戦チーム間の相互作用を選手の位置情報から得られたチーム重心位置及びチームストレッチ・インデックス、チーム縦幅、チーム横幅で分析した。その結果、チーム重心位置は対戦チーム間で同期して移動し、強い相互作用があることが報告されている。また、ゴールやシュート、タックルなどのイベント時はチーム全体が収束するといった一般的な認識が支持されないと考察されている (Bartlett et al., 2012)。これらの研究に基づいたユース年代のスモールサイドゲームの分析では、チーム縦幅と横幅の比率及び対戦チーム間の重心位置の距離を解析した結果、これらの変数の変動性は、年代に関わらず一貫してチームの拡がりや集中の原則を適用していることを示唆した (Folgado et al., 2014)。チームの拡がりや集中の原則にフォーカスした研究で、Moura et al.は攻撃時と守備時のチーム凸面積とチームストレッチ・インデックスを特徴づけることと、シュートブロック時とオンターゲットシュート時のチーム組織を分析した。その結果、攻撃局面のチーム凸面積とチームストレッチ・インデックスは、守備局面に比して有意に小さいことが明らかになった。守備局面でゴールへシュートを打たれた場合は、シュートブロックできた場合に比して、有意に大きな凸面積と選手間の拡がり性を示した (Moura et al., 2012)。これらの先行研究で採用されてきたチーム面積やチームストレッチ・インデックス、チーム重心位置、チーム縦幅と横幅などの集団的指標は、集団の分析指標として現在でも扱われている (Sathyan et al., 2012)。

Moura, et al., 2013; Vilar et al., 2013; Folgado et al., 2014; Clemente et al., 2014) . Clemente et al.は、得点状況が集合的指標（チーム重心位置、チームストレッチ・インデックス、チーム面積、プレー有効面積）に及ぼす影響を分析した。その結果、負けている状況は、より相手ゴールに向かって前進するために、ピッチ内の選手の縦方向の分散が増加することが示された。さらに、その状況では選手間のスペースを縮小し、よりコンパクトさを増加させた。勝っている状況は、チーム中心位置が低くなり、よりチーム自陣ゴールに近づいた。勝敗の結果に対して、チームのコンパクトさは、ほぼ同じであった（Clemente et al., 2014）。

### 1.2.2 サッカーにおける位置情報取得システムを用いた研究成果

サッカーにおける位置情報取得システムを用いた研究成果は、主として攻撃に関するイベントデータ（得点、シュート、パスなど）との関連性（Duch et al., 2010; Klemp et al., 2021）やネットワーク理論に基づく分析（Passos et al., 2011; Pena and Touchette, 2012）, 数理モデルの開発（Pollard and Reep, 1997; ）が先行して行われてきた。他にも攻撃チームと守備チームのボールまでの最小到着時間に対応する2つの変数を考慮して研究（Narizuka et al., 2020; Narizuka et al., 2021）や機械学習（Joseph et al., 2006）やデータ駆動型を用いたモデルを組み込み、空間的な評価の可視化に試みた研究がある（Piersma et al., 2020, Martens et al., 2021）. Memmert et al.は、バイエルン・ミュンヘン対FCバルセロナといったハイレベルな試合の位置情報に基づいて、動的システムとニューラルネットワークの観点から3つの異なるアプローチを検討した。それらは、選手間の連携、重要なイベントの前のチーム間およびライン間の連携、チーム間の相互作用とコンパクトネス係数を明らかにした（Memmert et al., 2017）. Anzer and Bauer（Anzer and Bauer., 2021）は、位置情報とイベントデータに基づき、従来のモデルよりも予測率の良い得点確率（xG）モデルを開発した。また、Goes et al.（Goes, 2020）は、オランダエールディビジョンの118試合のトラッキングデータを収集し、攻撃の成功に関連する動的なサブグループの時空間的な行動を分析した。その結果、成功した攻撃と成功しなかった攻撃を比較し、成功した攻撃は攻撃チームと守備チームとの相互作用の縦断的なチーム間およびチーム内の同期性が低下（ $p < 0.01$ ）することが明らかになった。Sampaio and Maçãsは、GPSによる位置情報を取得し、スモールサイドゲームによる事前・事後テストにより、13週間のトレーニングプログラムの効果を評価した。テスト後は、それぞれの選手間のエントロピー値が低くなり、トレーニングプログラム

が効果的に作用し、プレー行動が規則的になったことを示唆した。また、テスト後の相対位相値は、チーム重心位置と選手間の距離の平均値（チームストレッチ・インデックス）によって計算され、逆位相で移動する期間が頻繁に存在することが示された（Sampaio and Maçãs, 2012）。Folgado et al.は、プロサッカーの試合の対戦相手のレベルに応じた時間-運動要求とチーム内運動の同期性を定量化した。時間-運動要求として、総走行距離と異なる速度カテゴリーでの走行距離で測定した。チーム内の同期性は、10人の選手のすべてのペアの相対的な位相を計算した。その後、これらのデータを対戦相手のチームレベル（1部リーグ、2部リーグ、アマチュア）によって比較した。時間-運動要求は、対戦相手のレベルによる総走行距離の差は見られなかったが、格上チームとの試合は非常に高い強度でより多くの走行距離を示した。格上チームとの対戦は、より多くの時間で選手が同期した挙動が見られた。これらの結果は、より格上の対戦相手では、チーム内の動きの同期性と連動して、高強度での時間-運動要求が増加することを示唆している（Folgado et al., 2014）。他にも、GPSによる位置情報から試合中のディフェンダー、ミッドフィルダー、フォワード間の時間-運動要求、身体負荷、運動行動の違いを明らかにした研究（Gonçalves et al., 2014）がなされた。

### 1.2.3 サッカーにおけるトランジションの評価のための位置情報解析に関する研究成果

トランジションは、ボールを失った後に素早く、直接的かつ相手自陣でボール奪取した際に得点機会につながるということが明らかにされている。Grehaigine et al.は、試合中の位置情報を記録し、システム論的アプローチを用いてトランジションの分析手順を提案した（Grehaigine et al., 1997）。トランジションの種類と場所に着目した研究（Barreira et al., 2014）では、トランジションはインターセプトとそれに続くパスといった直接的なボール奪取が、その後の効果的な攻撃プレーを誘発していることが報告されている（ $p < 0.017$ ）。また、自陣の中央でのボール奪取は、他の場所でのボール奪取の頻度よりも多いことを証明した（ $p < 0.001$ ）。特に、自陣の中央での直接的なボール奪取は、その後の攻撃効率が高まることを明らかにした。さらに、Barreira et al.は、試合会場、試合状況、相手レベルがボール奪取の種類と場所に及ぼす影響を検証した。その結果、高レベルのチームは勝っているときでも、相手からボール奪取することを目的としたより積極的な守備戦略を維持しようとしていた。これらの結果から、守備局面では、選手らは自陣の中央エリアを守ると同時に、ボール保持者を牽制するために高プレッシャーをかける集団的守備組織を作ることが求め

られると示唆する。さらに、トランジションはインターセプトとそれに続くパスといった直接的なボール奪取が、その後の効果的な攻撃プレーを誘発していることが報告されている ( $p < 0.017$ ) (Barreira et al., 2014)。他にも、トランジションの場所と時間に着目した研究 (Casal et al., 2016) では、ボール保持の回復に関連する変数を特定し、トランジションの成功の予測モデルを提案した。その結果、トランジションは中央相手自陣から始まることが最も多く、ボール保持の回復と最も影響する変数は、ボールを失った場所であることが示された。さらに、相手チームのボール保持後0秒から15秒でのトランジションは、直接的にボール奪取する可能性が高いことが示された (Casal et al., 2016)。

戦術的なゲーム分析におけるトラッキングデータの分析は、従来の表記分析に比べ、サッカーのパフォーマンスに関するより詳細な洞察が得られるため、関心が高まっている。そのような背景の中で、攻撃的なプレーの多様で詳細な分析に比べ、守備的なプレーを分析する研究の数は少なかった (Suzuki and Nishijima, 2004)。近年は、守備的なプレーの研究は増加傾向にあり、この分野の研究は有益であると考えられる。それらの研究レビューでは、選手のトラッキングデータを用いたプロサッカーにおける守備的なプレーを分析するために用いられてきたアプローチを明らかにし、守備的なプレーの成功に関する23件の知見を明らかにした。その結果、戦術的なプレーを個人レベル、グループレベル、チームレベルに分類して整理した (Forcher et al., 2022a)。守備的なプレーを分析する研究は、ボール保持者へのプレッシャーの分析、選手間の同調性の行動分析、ボール奪取など、研究アプローチは非常に異質であることが報告されている。

Clemente et al.は、試合中の選手の直交座標位置のみを考慮したサッカーの戦術的ポジションの特定から、守備的なプレッシングを分析するDPAという新しい概念を導入した。ケーススタディとして、このアプローチを3試合の公式戦で検証し、DPAは4つの相対的な領域に整理された。その結果、中盤自陣側の守備的プレッシングが他の領域と比較して、DPAが最も高く、2番目の領域は中盤相手陣地側であり、中盤全体で多くの守備的プレッシングが行われていることが示唆された。また、各領域の守備のトライアングル数は、勝っているときに中盤領域のトライアングル数の統計的平均が最も高く、中盤のプレッシングの強さが勝利につながることを示唆している (Clemente et al., 2016)。Low et al.は、ハイプレスな守備と自陣の深い位置での守備という2つの対照的な戦術の効果进行分析した。その結果、ハイプレス戦術をとることで、チーム間距離が近くなり、チームの縦幅が長くなることで分

散が大きくなり、ディフェンダー、ミッドフィルダー、フォワード間のライン間距離が大きくなることがわかった。さらに、攻撃チームへの影響としては、ボールポゼッション時間の短縮、攻撃的ミッドフィルダーとフォワードの個人エリアの拡大、チームの縦幅の延長、より多くの侵入パスの実行などが挙げられた (Low et al., 2021) 。 Fernandez-Navarro et al. は、ピッチの高いエリアでボール奪取時のチームの守備行動を調べることと守備行動に対するコンテキスト変数の影響を評価した。その結果、相手自陣からの守備的プレーの結果 ( $\chi^2 = 111.87, p < 0.01$ ) と、ボール奪取後の攻撃的プレーの結果 ( $\chi^2 = 49.92, p < 0.001$ ) には、チーム間で有意差があった。その後のクラスター分析では、ハイプレスや自陣ゴールに近い守備までの異なる守備行動を示す4つのグループが明らかになった。試合に勝ったチームは、自陣ゴールに近いゾーンでボール奪取し、負けたチームはピッチの高いエリアでボール奪取していた。さらに、相手レベルが高いほど、ピッチの高いエリアでのボール奪取の機会は少ないことが報告されている (Fernandez-Navarro et al., 2020) 。

守備的なプレーの評価として、得点よりも発生頻度の高いボール奪取における選手の行動と全選手とボールの位置情報からパフォーマンスを予測した研究が行われている。これらの研究は、チームのパフォーマンスを総合的な観点からチームの守備力を評価する手法を提案した (戸田ら, 2021, Toda et al., 2022) 。 また、個人の守備的なプレーを評価した研究もなされている (Merhej et al., 2021, Ferreira et al., 2021) 。 守備的なプレッシャーの特徴を調査し、成功した守備的なプレー局面を分析した研究では、試合中のトラッキングデータとイベントデータを評価した。ボール保持者へのプレッシャーは、ボール奪取に至る最後の10秒間で測定され、ボール保持者へのプレッシャー、グループ (ボールに最も近い5人のアタッカー) へのプレッシャー、チーム全体へのプレッシャーに区別された。これらの特徴として、守備的なプレッシャーは、ボールにより近い領域と守備的なプレーの終わりに近い領域で高いことを示しており、特に守備的なプレーが成功した場合に当てはまることが報告されている (Forcher et al., 2022b) 。 さらに、Forcher et al. は、守備のコンパクトな組織形成のプレー原則と守備の成功との関連を調査することを目的とし、トラッキングデータとイベントデータに基づき、守備チームのコンパクトネスと組織化を、守備の成功したプレーと失敗したプレー間で比較した。その結果、チーム全体のコンパクトさ及び組織的な指標は、成功時と失敗時でほとんど差がなかったが、ボールに最も近い5人のディフェンダーからなる守備サブグループは、成功時は失敗時に比べて高いコンパクトネスを示した ( $-0.08 \leq d$

≧ -0.16) ことから、守備の成功はボールに近い選手のコンパクトさが重要であると示唆されている (Forcher et al., 2023) . Welch et al.は、試合中の様々な局面における選手の動きを分析することで、チームに存在する秩序化/無秩序化された行動のパターンと、それらの間のトランジションの性質を分析した。その結果、チームは集中と拡散の集団状態を形成することが示された。個々の選手の動きの予測は、選手の行動間の角度分散により、集団の速度が高くなると低下し、守備局面における集団の動きは、攻撃やアウトオブプレーの局面に比べて、秩序があり、コンパクトで動きが速いことを示した (Welch et al., 2021) . Bradleyは、FIFAW杯カタール2022におけるポジションの役割要求をコンテキスト化し、ベンチマークを明らかにすることを目的とした。FIFAの公式承認のもと、大会期間中の全試合をマルチカメラコンピュータトラッキングシステムで分析した。その結果、ポジション別の総走行距離、強度別の走行距離の違いを明らかにした。これらの知見は、国際サッカーにおける現代のポジションの要求に関する貴重なコンテキスト情報を提供するものと示唆した (Bradley, 2023a) . さらに、Bradleyは、同様の分析方法を用いて、高強度走行の回数とプレーの局面でのイベントとの相関を分析した。その結果、全チームにおいて、ファイナルサードへ進むことに加え、守備のトランジションとリカバリーで有意な相関が認められた ( $r = 0.63-0.75, p < 0.01$ ) (Bradley, 2023b) .

### 1.3 サッカーにおけるトランジションの評価のための位置情報解析に関する研究課題

選手の位置情報を用いたトランジションの評価の研究は、ボール奪取時点での解析に留まっている。その事象の前後の選手の位置情報を解析し、効果的なトランジションの実現を報告した公開されている文献はほとんどない (Toda et al., 2021b) .

一般的な考え方によれば、高いレベルの戦術的な能力は、プレーヤーがチームスポーツで効果的なパフォーマンスを発揮するために不可欠である。ポジションデータを用いた主要な論文で議論されたアプローチは、その多くの自由度や制約の相互作用からどのようにパターンが現れるかを調べるものである。これらのパフォーマンス分析ツールはすべて、コーチがそのニーズに応じてトレーニング方法 (例えば、ゲーム哲学や戦術における最近のトレンドに注目する) を修正し、選手の戦術的行動を改善するのに役立つ可能性がある。また、ポジションデータに基づくこれらの新しいアプローチは、チームスポーツにおける戦術的パフォーマンス要素の客観化に向けた重要な一歩となり得る。このことは、さまざまな種類

のユーススポーツ（バスケットボール、チームハンドボール、サッカー、フィールドホッケー、テニス）における才能の選抜だけでなく、プロチームスポーツの分析にも大いに役立つと考えられる。スポーツのパフォーマンスとその相互作用に関する情報を提供するだけでなく、これらの新しいポジションデータ手法の診断の可能性も考慮されるべきである。これは、スポーツの実践（例えば、選手のパフォーマンスの洗練された評価）や科学（例えば、スポーツの指導方法の評価）において有用である。スポーツのほぼすべての側面で利用可能な大量のデータを持つ現在の情報技術の時代において、チームスポーツにおける戦術行動の自動的かつ迅速な評価システムは非常に望ましい。スポーツ科学的な手法の活用は、これまでごく限られた範囲にとどまっていた。しかし、スポーツ科学とコンピュータサイエンスのコラボレーションは、将来的に相乗効果をもたらす大きな機会をもたらすことが期待される。今後の研究では、3つの異なるアプローチから得られる3つの異なるタイプの成果の詳細な比較にも焦点を当てるようにすべきである。さらなる分析として、例えば、戦術的パフォーマンスに関する知見を、ある重要な瞬間や局面におけるディフェンス選手やオフENS選手の戦術的パフォーマンスと直接比較することができるだろう。しかし、このような調査には、パフォーマンス分析における一般的な理論的枠組みも必要となる。これは困難な課題ではあるが、理論的かつ実用的な観点から、ポジションデータに基づくパフォーマンス分析アプローチを促進することができるだろう。また、これらの研究の大半は、サンプルサイズが小さいことが課題としてあげられる。非常にダイナミックなチームスポーツであるサッカーは、パフォーマンス指標は非常に多様であり、この文脈ではサンプルサイズが小さいと、結果の全体的な一般性が低下すると考えられる。さらに、ほぼ半数の研究では、守備の成功に関連するアプローチを調査していないことは、実際の意義を示す上で重要である。サンプルサイズは、開発されたパフォーマンス指標や処理アプローチのどちらの限界においても、結果の一般的妥当性を低下させることにつながる。

成功との関連性を考慮したこれらの研究では、成功をさまざまなレベル（シーズン、ゲーム、ポゼッションレベル）で定義している。そのため、ポゼッションレベルでの守備の成功の分析は、試合レベルやシーズンレベルと比較して、偶発的な影響が小さいため、戦術的プレーに関する洞察を明らかにすることができる。研究デザインによっては、試合レベルでの勝敗にも関連がある可能性がある。シーズンレベルでの成功の分析では、攻撃や守備のシーケンスの条件を見ることができない。したがって、ボール奪取の場面など、あるプレー場

面での瞬間的なポイントの分析だけでなく、守備のプロセス全体を調査することが重要である。特に、実践的な関連性を高めるためには、守備的なプレーのパフォーマンスを決定する要因を見つけることが重要であるが、ほとんどの研究は、それらの実践を重視した考察を欠いており、そのため、ほとんどの論文の実践的な妥当性は低いままである。そのような背景がある中、トラッキングデータを用いた評価の可能性により、これらの課題を打ち消すことができる。プロレベルの競技試合から大量のデータが入手可能であり、従来の（例えば記名式の）分析方法と比較して、時間を節約し、より細かな分析が可能であることは、将来のサッカーの試合分析に非常に重要な可能性を示している。つまり、トラッキングデータを用いた迅速かつ詳細であり、実践に即した議論と結果の使いやすさに焦点を当てた研究、フィードバックが求められている。

サッカーでトラッキングデータの評価のような新しい分析アプローチを用いることは、守備的なプレーのパフォーマンス構造に関する新しいフィードバックを提供する可能性を秘めている。守備局面でのプレーの目的は、自陣ゴールを守り、ボールを奪取することである。このボール奪取は、状況変数（試合状況、試合場所、対戦相手のレベル）に影響される。さらに、守備を成功させるには、攻撃陣に高いプレッシャーをかけることと、コンパクトなチーム編成を実現することが重要である。守備局面でのコンパクトなチーム編成は、攻撃チームを前進させるスペースを最小化するために重要であり、それによって守備チームは、ボールの移動に合わせて、ボール保持者に素早くプレッシャーをかけることができる。それらに加えて、守備を成功させるためには、チーム内の選手間の同期的な行動が重要である。

#### 1.4 本研究の目的と本論文の構成

本研究は、GPSで得られた選手の位置情報から算出した指標に基づき、ボール奪取時の選手の動きを定量化し、選手の位置情報から攻撃局面時にトランジションを効率的に成立させる要因を明らかにすることを目的とした。

本論文は本章を含め、全5章により構成されている。本章を除いた2章以降の概要を以下に述べた。第2章では、チームのプレーエリアが相手ゴールに近くなるとチーム凸面積は大きくなり、プレーエリアが自陣ゴールに近くなるとチーム凸面積は小さくなるという仮説を立てた。その検証のために、プロサッカーの公式試合で、プレー局面とプレーエリアが10人のフィールドプレイヤーで構成されるチーム凸面積に与える影響を明らかにした。第3

章では、GPSで得られた選手の位置情報から算出した指標に基づき、ボール奪取時の選手の動きを定量化し、決定木分析を用いて、攻撃局面時にトランジションを効率的に成立させる要因を明らかにした。第4章では、同様の手法を用いて、ボール奪取前の守備最終局面の選手の動きを定量化し、攻撃局面時にトランジションを効率的に成立させる要因を明らかにした。第5章では、終章として本研究をまとめている。本研究の全体像として、それぞれの章に対する考察を包括的について述べる。

## 第2章

### プレー状況とプレーエリアで区分したチーム凸面積の解析

#### 2.1 研究方法

##### 2.1.1 解析対象

対象試合は、明治安田生命 J2リーグに所属するプロサッカーチームの2021年シーズンの第1節から第36節のホームで行われた明治安田生命 J2リーグの公式試合のうちの12試合とした。対象データは、フィールドプレイヤーの背中に装着されたGPSデバイス (Vector X7, CATAPULT, Australia) から取得された10 Hzの位置情報とした。対象区間は前半45分間 (アディショナルタイムを含む) とし、対象選手は先発した10人のフィールドプレイヤーとした。前半での選手交代はなかった。対象となった公式試合の結果は、4勝6敗2分であった。

##### 2.1.2 解析方法

本研究で用いた GPS デバイスは、FIFA で認証されており、デバイスと光学式トラッキングシステムで得られた測定値の二乗平均平方根差 (RMSD) の比較で、信頼区間が 95% 以内のデバイスである。また、このデバイスと光学式トラッキングシステム (TRACAB, Chyronhego, New York, USA) を比較し、高い正の相関 ( $r > 0.72$ ) があり、デバイス精度の有効性があると考察している (Ellens et al., 2021)。取得された位置情報は、数値解析ソフトウェア (Matlab, MathWorks, USA) を用いて、サッカーのフィールド内の平面座標系に変換し、短軸方向を x 軸、長軸方向を y 軸とした。また、チーム重心位置  $G(x, y)$  は、式 (1) のように計算できる。

$$G_x = \left( \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_{10} m_{10}}{m_1 + m_2 + \dots + m_{10}} \right), G_y = \left( \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2 + \dots + y_{10} m_{10}}{m_1 + m_2 + \dots + m_{10}} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

チーム重心位置は、10 人のフィールドプレイヤーの座標の値を合成し、平均値を算出したもので、選手の配置の重心点である (菅他, 2001)。

さらに、チーム凸面積  $Team_{ca}$  は、式 (2) のように計算できる。

$$Team_{ca} = \left\{ \sum_{i=1}^{|S|} \alpha_i \mathbf{x}_i \mid (\forall i : \alpha_i \geq 0) \wedge \sum_{i=1}^{|S|} \alpha_i = 1 \right\} \quad \dots\dots\dots \text{(式 2)}$$

チーム凸面積は、10人のフィールドプレイヤーで構成される凸包面積をMatlab内のconvhull関数（Quickhull法）を用いて算出した（Moura, et al., 2012）。プレーエリアは、チーム重心位置に基づいて、フィールドの自陣ゴール側からディフェンシブサード、ミドルサード、アタッキングサードと3つに区分した。チーム重心位置のY座標が0～35 mの範囲にある区間をディフェンシブサード、35～70 mの範囲にある区間をミドルサード、70～105 mの範囲にある区間をアタッキングサードと区分した。この3区分は、日本の指導者ライセンスの教本に活用され、指導者が選手を指導する際にプレーエリアごとに指導を行うために使用されている。

プレー状況を評価するために、試合中の映像をビデオカメラ（FDR-AX45, SONY, Japan）で記録した。図1にプレー計測の環境を示した。記録方式はAVCHD, フレームレートは60fpsで撮影した。撮影した映像は映像分析ソフト（SportsCode, Hudl, USA）に取り込んだ。プレー状況は、攻撃、守備、アウトオブプレーに分類した（Lago, et al, 2009）。



図1. 試合中のビデオカメラによるプレー計測の環境

撮影した映像から攻撃時は対象チームのフィールドプレイヤーがボールを保持し、対象チームが攻撃を行っている時間と定義し、守備時は、相手チームのフィールドプレイヤーがボールを保持し、対象チームが守備を行っている時間と定義した。アウトオブプレーは、ボールがラインを完全に越えてフィールドの外に出て、次に試合が再開されるまでの時間と、

主審が笛を吹いてプレーを止めたときに、次に試合が再開されるまでの時間と定義した。プレー状況での試合時間、プレーエリアとプレー状況別の攻撃時と守備時のチーム重心位置が位置していた時間、プレーエリア別の攻撃時と守備時のチーム重心位置、また、プレーエリア別の攻撃時と守備時のチーム凸面積を算出した。

### 2.1.3 統計処理

各項目の測定結果は、試合毎に平均値と標準偏差を算出し、合計10試合での平均値±標準偏差で示した。チーム凸面積に対するプレー状況とプレーエリアの影響は、二元配置分散分析を用いて交互作用を検討した。また、プレー状況間の数値の比較は、t検定を行った。プレーエリア間の数値の比較は、一元配置分散分析を用いて有意差検定を行い、ボンフェローニの多重比較を行った。全ての統計解析は、統計解析ソフト（SPSS Statistics Version 24.0, IBM,USA）を使用した。統計的有意水準は5%とした。

## 2.2 結果

表1にプレー状況別の試合時間を示した。試合時間は、プレー状況の間で主効果が認められた ( $p < 0.001$ )。アウトオブプレーの試合時間は、攻撃時および守備時に比して有意に長かった ( $p < 0.05$ )。

表1. プレー状況別の試合時間

プレー状況	時間 (秒)	一元配置分散分析 $P(F)$
攻撃局面	848 ± 232	$p < 0.001$ $F = 17.232$
守備局面	795 ± 171	
アウトオブプレー局面	1220 ± 103 <sup>a,b</sup>	
合計	2862 ± 49	

<sup>a</sup> 攻撃局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ) , <sup>b</sup> 守備局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

表2にプレー状況とプレーエリア別の試合時間の結果を示した。試合時間は、プレー状況とプレーエリアの間に有意な交互作用が認められた。試合時間は、攻撃時と守備時ともに、

プレーエリア間で主効果が認められた ( $p < 0.001$ )。多重比較において、攻撃時のミドルサードの試合時間は、ディフェンシブサードとアタッキングサードの試合時間に比して有意に長かった ( $p < 0.05$ )。また、守備時の試合時間は、全てのプレーエリアで有意差があり、アタッキングサードの試合時間、ディフェンシブサードの試合時間、ミドルサードの試合時間の順で長かった ( $p < 0.05$ )。さらに、プレー状況間での比較の結果、ディフェンシブサードでは、攻撃時の試合時間に比して守備時の試合時間が有意に長く ( $p < 0.05$ )、アタッキングサードでは、攻撃時の試合時間に比して守備時の試合時間が有意に短かった ( $p < 0.05$ )。

表 2. プレー状況とプレーエリア別の時間

プレーエリア	攻撃局面(秒)	守備局面(秒)	二元配置分散分析 $P(F)$
ディフェンシブサード	115 ± 56	245 ± 84	$p = 0.001$
ミドルサード	550 ± 153 <sup>a</sup>	515 ± 145 <sup>a</sup>	$F = 7.974$
アタッキングサード	154 ± 53 <sup>b</sup>	65 ± 36 <sup>a,b</sup>	局面の主効果 $p = 0.931$
一元配置分散分析 $P(F)$	$p < 0.001$ $F = 71.396$	$p < 0.001$ $F = 62.936$	エリアの主効果 $p < 0.001$

<sup>a</sup> ディフェンシブサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ ) , <sup>b</sup> ミドルサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

表 3 にプレー状況とプレーエリア別のチーム重心位置 (Y 軸) の結果を示した。チーム重心位置は、プレー状況とプレーエリアの間に有意な差が認められた。チーム重心位置は、攻撃時と守備時ともに、プレーエリア間で主効果が認められた ( $p < 0.001$ )。多重比較において、チーム重心位置は、攻撃と守備ともに全てのプレーエリアで有意な差が認められた ( $p < 0.05$ )。

表3. プレー状況とプレーエリア別のチーム重心位置 (Y軸)

プレーエリア	攻撃局面(m)	守備局面(m)	二元配置分散分析 $P(F)$
ディフェンシブサード	26.9 ± 2.5	22.5 ± 2.3 *	$p = 0.033$
ミドルサード	52.2 ± 1.9 <sup>a</sup>	50.9 ± 2.2 <sup>a</sup>	$F = 3.607$
アタッキングサード	77.8 ± 1.4 <sup>a,b</sup>	75.9 ± 1.9 <sup>a,b</sup>	局面の主効果 $p < 0.001$
一元配置分散分析 $P(F)$	$p < 0.001$ $F = 1964.8$	$p < 0.001$ $F = 1838.8$	エリアの主効果 $p < 0.001$

\* 攻撃局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>a</sup> ディフェンシブサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>b</sup> ミドルサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

表4にプレー状況とプレーエリア別のチーム凸面積の結果を示した。チーム凸面積は、プレー状況とプレーエリアの間に有意な差が認められた。チーム重心位置のY軸は、攻撃時と守備時ともに、プレーエリア間で有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。多重比較において、チーム重心位置のY軸は、攻撃と守備ともに全てのプレーエリアで有意な差が認められた ( $p < 0.05$ )。さらに、プレー状況間での比較の結果、ディフェンシブサードでは、攻撃時のチーム凸面積に比して守備時のチーム凸面積が有意に小さかった ( $p < 0.05$ )。

表4. プレー状況とプレーエリア別のチーム凸面積

プレーエリア	攻撃局面(m)	守備局面(m)	二元配置分散分析 $P(F)$
ディフェンシブサード	842 ± 119	536 ± 53 *	$p < 0.001$
ミドルサード	1036 ± 104 <sup>a</sup>	792 ± 109 <sup>a</sup>	$F = 19.39$
アタッキングサード	922 ± 90 <sup>a,b</sup>	950 ± 102 <sup>a,b</sup>	局面の主効果 $p < 0.001$
一元配置分散分析 $P(F)$	$p < 0.001$ $F = 10.26$	$p < 0.001$ $F = 62.60$	エリアの主効果 $p < 0.001$

\* 攻撃局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>a</sup> ディフェンシブサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>b</sup> ミドルサードに対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

## 第3章

### トランジションを成立させるためのボール奪取時の位置情報解析

#### 3.1 研究方法

##### 3.1.1 解析対象

対象としたチームは、明治安田生命J2リーグに所属するプロサッカーチームであった。対象試合は、明治安田生命J2リーグ公式試合の2022年の第1節から第42節のホーム戦、全21試合のうち、トラッキングデータ取得不良であった1試合を除外した20試合であった。試合情報は、Jリーグ公式サイトから確認した。対象試合の天候は、晴れが14試合で、曇りが6試合であった。その他の試合情報は、表5に示した(J-League, 2022)。基礎データは、各試合におけるGKを除く、先発10名と控え6名のフィールドプレイヤーの背中に装着されたGPSデバイス(Vector X7, Catapult, Australia)により取得された10 Hzの緯度経度データとした。対象区間は、前後半の90分間(アディショナルタイムを含む)とした。対象選手は、GKを除く、26名で延べ296名であった。その内訳は、先発フル出場した選手が述べ104名で、途中交代した選手が述べ96名で、途中出場した選手が述べ96名であった。本研究で用いたGPSデバイスの精度と再現性は、先行研究で保証されている。本デバイスは、FIFAの承認を受けており、得られた位置情報の誤差範囲は50 cm以内である。Ellens et al.(2021)は、本研究で使用したGPSと光学式トラッキングシステム(TRACAB, Chyronhego, USA)のシステム間の互換性を判断するため、総移動距離、高速走行距離(19.8~25.2 km/h<sup>-1</sup>)、スプリント距離(> 25.2 km/h<sup>-1</sup>)、最高速度を比較した。その結果、GPSと光学式トラッキングシステムは、非常に強い正の相関( $r > 0.72$ )があることを確認した。したがって、本デバイスは本研究での使用に可能な範囲であることが確認されている。

表 5. 試合結果および気温、湿度、得点等の情報 (Jリーグ公式サイトから引用)

項目	情報		
試合結果	12 勝	3 敗	5 分
温度 (°C)	23.4 ± 6.4		
湿度 (%)	50.9 ± 20.0		
出場選手 (n)	14.8 ± 0.5		
得点 (点)	1.8 ± 1.4		
失点 (点)	0.9 ± 0.7		
得失点 (点)	0.9 ± 1.6		

### 3.1.2 解析方法

取得された選手の10 Hzの緯度経度データは、数値解析ソフトウェア(Matlab, MathWorks, USA)を用いて、サッカーのピッチの直角平面座標系に変換した。チーム凸面積は、Quickhull アルゴリズムを用いてGKを除く10人の選手で構成される凸包面積として算出した。

$$Team_{ca} = \left\{ \sum_{i=1}^{|S|} \alpha_i x_i \mid (\forall i : \alpha_i \geq 0) \wedge \sum_{i=1}^{|S|} \alpha_i = 1 \right\} \dots\dots\dots (式)$$

本研究で用いたQuickhullアルゴリズムは、類似したサッカーの先行研究(Moura et al., 2012)でも使用されているため、本研究でも使用した。このアルゴリズムの手順は、まず、10人の選手の座標の最大点と最小点を求め、その二点間で結んだ直線で領域を分割した。次に、その直線の二つの最遠点を求め、最大点と最小点、二つの最遠点の4点での辺(エッジ)を定義した。その後、4辺で構成された面の中の位置座標を無視し、各辺の外側にある座標について再帰的に繰り返した。外側の座標がなくなったら計算を終了した。また、先行研究(Low et al., 2021)の方法に従い、チーム最前線はGKを除く10人の選手の中で最も相手ゴールに近い選手の位置とした。チーム最後尾はGKを除く10人の選手の中で最も自陣ゴールに近い選手の位置とし、チーム最前線と最後尾の差分をチーム縦幅とした。チーム最右側は、GKを除く10人の選手の中で最も右側のタッチラインに近い選手の位置とした。チーム最左側はGKを除く10人の選手の中で最も左側のタッチラインに近い選手の位置とし、チーム最右側とチーム最左側の差分をチーム横幅とした。また、プレー状況を評価するためにスタジ

アムの屋上から実際の試合をビデオカメラ(FDR-AX45, Sony, Japan)で撮影した。記録方式はAVCHD, フレームレートは60 fpsであった。

プレー局面は, 先行研究(Lago, 2009)の方法に従い, 攻撃局面, 守備局面, アウト・オブ・プレーに分類した。攻撃局面は, 分析対象チームの選手がボールに触れてから, 相手チームの選手がボールに触れるまでの区間とした。守備局面は, 相手チームの選手がボールに触れてから, 分析対象チームの選手がボールに触れるまでの区間とした。アウト・オブ・プレーは, ボールがタッチラインおよびゴールラインを越えてピッチの外に出てから, その後スローインやゴールキックで試合が再開されるまでの区間及び審判が反則やオフサイドなどでプレーを止めるために笛を吹いてから, 直接または間接フリーキックやドロップボールで試合が再開されるまでの区間とした。

ボール奪取後のトランジション成立の評価アルゴリズムは, 先行研究(Garganta, 1997, Barreira et al., 2011, 2014, Santos et al., 2017)の方法に従い作成した。本アルゴリズムを用いて, 相手チームのボール保持状況から分析チームの選手がボールに触れて, 攻撃局面になった最初のプレーを評価した。その後, ボール保持の回復の種類でボール奪取とボール回収に分類した。ボール奪取はインターセプト, タックル, ゴールキーパーが関与したプレーに分類された。ボール回収とゴールキーパーが関与したプレーは, 本研究の分析対象外とした。トランジション成立は, ボール奪取した後のプレーを評価し, 分析チームの選手がチーム合計で3回以上のボールタッチをした場合とした。トランジション不成立は, 分析チームの選手がチーム合計で2回以下のボールタッチをした場合とした。図2に映像分析評価システムのアルゴリズムを示した。

取得された位置情報は, 数値解析ソフトウェア (Matlab, MathWorks, USA) を用いて, サッカーのフィールド内の平面座標系に変換し, 短軸方向をx軸, 長軸方向をy軸とした。

### 3.1.3 統計処理

位置情報の測定結果は, 試合毎に平均値と標準偏差を算出し, 対象とした全20試合での平均値  $\pm$  標準偏差で示した。試合全体の攻撃局面, 守備局面, アウト・オブ・プレーの間の数値の比較は, 対応のない一元配置分散分析を用いて主効果を検討し, 主効果が認められた場合は, ボンフェローニの多重比較を行った。前半と後半のそれぞれの攻撃局面と守備局面間の数値の比較は対応のないt検定を行った。また, トランジション成立時と不成立時の数

値の比較は、対応のないt検定を行った。さらに、ボール奪取時の位置情報からトランジション成立の要因を分析するために、分析対象とした655件のプレーを用いて、位置情報を独立変数とし、トランジション成立と不成立を従属変数とした決定木分析（CHAID手法）を実施し、不純度の測度としてピアソンの $\chi^2$ 検定統計量を使用した。全ての統計解析は、統計解析ソフト（SPSS Statistics Version 24.0, IBM, USA）を使用した。統計学的有意水準は5%とした。

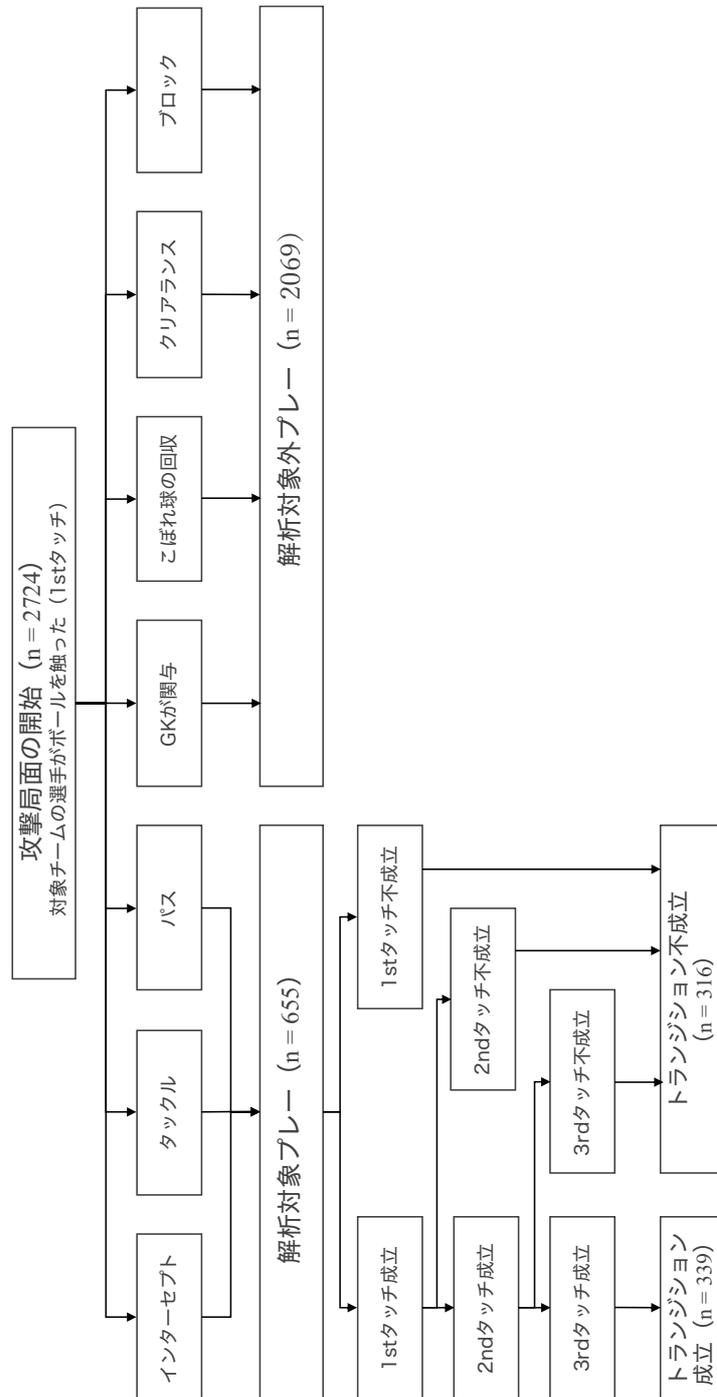


図2. 映像分析評価システムのアルゴリズム

### 3.2 結果

#### 3.2.1 時間区分と局面区分での位置情報指標

表6に対象とした20試合の時間区分における各局面の位置情報の比較結果を示した。試合全体の位置情報は、攻撃局面の時間、チーム凸面積、チーム縦幅、チーム最前線、チーム

最後尾, チーム横幅, チーム最右側, チーム最左側は, 守備局面の時間( $p < 0.001$ ), チーム凸面積( $p < 0.001$ ), チーム縦幅( $p < 0.001$ ), チーム最前線( $p = 0.001$ ), チーム最後尾( $p = 0.011$ ), チーム横幅( $p < 0.001$ ), チーム最右側( $p = 0.007$ ), チーム最左側( $p < 0.001$ )に比して, 有意な差が認められた. 前半と後半ともに守備局面の時間は, 攻撃局面のそれに比して有意に長かった( $p < 0.05$ ). 守備局面のチーム凸面積, チーム縦幅, チーム横幅, チーム最左側は, 攻撃局面のそれに比して前半と後半ともに有意に高かった( $p < 0.05$ ). 守備局面のチーム最前線は, 攻撃局面のそれに比して前半と後半ともに有意に低かった( $p < 0.05$ ).

### 3.2.2 トランジションの成立・不成立でのボール奪取時の位置情報指標

表7に対象とした20試合のトランジション成立と不成立におけるボール奪取時の位置情報の比較結果を示した. 相手チームのボール保持状況から分析チームの選手がボールを触ったプレー回数は合計2734回, 分析対象プレー回数は合計655回で, そのうちトランジション成立は合計339回, 不成立は合計316回であった.

図3にトランジション成立と不成立の決定木分析の結果を示した. 最初の分割ステップでは, チーム最後尾が基準変数(45.2 m)に選ばれた. 次のステップで, チーム最後尾が45.2 m以下の場合, 説明変数としてチーム最左側が, チーム最後尾が45.2 mより高い場合は, 説明変数としてチーム凸面積が採用された. チーム最左側のさらなる分割で, チーム最左側が5.5 m以下の場合, 説明変数としてチーム最後尾が, チーム最左側が5.5 mより高い場合は, 説明変数としてチーム最前線が採用された. 最もトランジション成立時の優良率が高い場合は, チーム最後尾が45.2 m以下で, チーム最左側が5.5 m以下で, チーム最後尾が17.2 mで, 85.2%であった. 次点でチーム最後尾が45.2 mより高値で, チーム凸面積が483 m<sup>2</sup>より大きく1024 m<sup>2</sup>以下の場合で83.3%であった.

表 6. 20 試合の時間区分における各局面の位置情報の比較

局面	時間[秒]	凸面積 [m <sup>2</sup> ]	縦幅 [m]	最前線 [m]	最後尾 [m]	横幅 [m]	最右側 [m]	最左側 [m]
攻撃	1457 ± 215	1109 ± 153	36.5 ± 3.0	70.1 ± 4.9	33.6 ± 4.5	47.0 ± 5.0	57.3 ± 4.0	10.6 ± 2.5
フル タイム	1801 ± 336 <sup>a</sup>	821 ± 109 <sup>a</sup>	32.5 ± 3.4 <sup>a</sup>	35.0 ± 1.4 <sup>a</sup>	63.2 ± 4.4	30.8 ± 3.3 <sup>a</sup>	54.8 ± 3.2	16.1 ± 2.0 <sup>a</sup>
アウトオブ プレー	3425 ± 253 <sup>a,b</sup>	769 ± 105 <sup>a</sup>	31.8 ± 2.9 <sup>a</sup>	67.1 ± 6.8	35.4 ± 6.1 <sup>b</sup>	38.5 ± 4.1 <sup>a</sup>	53.6 ± 3.8 <sup>b</sup>	15.2 ± 2.4 <sup>a</sup>
前半	734 ± 134	1171 ± 190	36.7 ± 2.8	70.9 ± 5.4	34.2 ± 5.2	48.7 ± 6.3	58.9 ± 3.8	10.6 ± 3.4
守備	904 ± 210 <sup>a</sup>	852 ± 120 <sup>a</sup>	32.7 ± 3.5 <sup>a</sup>	66.2 ± 4.4 <sup>a</sup>	33.5 ± 3.2	39.4 ± 3.9 <sup>a</sup>	55.8 ± 3.2 <sup>a</sup>	16.5 ± 3.0 <sup>a</sup>
後半	721 ± 122	1034 ± 173	36.2 ± 3.6	69.4 ± 5.0	33.3 ± 5.1	44.8 ± 5.6	55.5 ± 6.1	10.9 ± 2.5
攻撃	910 ± 157 <sup>a</sup>	784 ± 126 <sup>a</sup>	32.2 ± 3.5 <sup>a</sup>	60.8 ± 5.3 <sup>a</sup>	28.6 ± 4.5 <sup>a</sup>	37.8 ± 4.4 <sup>a</sup>	53.6 ± 4.8	16.0 ± 1.8 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 攻撃局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>b</sup> 守備局面に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ).

表 7. 20 試合のトランジョン成立と不成立におけるボール奪取時の位置情報の比較

トランジョン成否	n	凸面積 [m <sup>2</sup> ]	縦幅 [m]	最前線 [m]	最後尾 [m]	横幅 [m]	最右側 [m]	最左側 [m]
成立	339	840 ± 313	33.8 ± 9.0	65.0 ± 18.6	31.2 ± 16.1	39.5 ± 9.6	54.5 ± 10.8	15.0 ± 10.1
不成立	316	788 ± 304 <sup>*</sup>	32.5 ± 8.6	58.7 ± 18.3 <sup>*</sup>	26.2 ± 15.1 <sup>*</sup>	38.0 ± 8.4 <sup>*</sup>	55.1 ± 10.8	17.1 ± 10.6 <sup>*</sup>

<sup>\*</sup> トランジョン成立に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ).

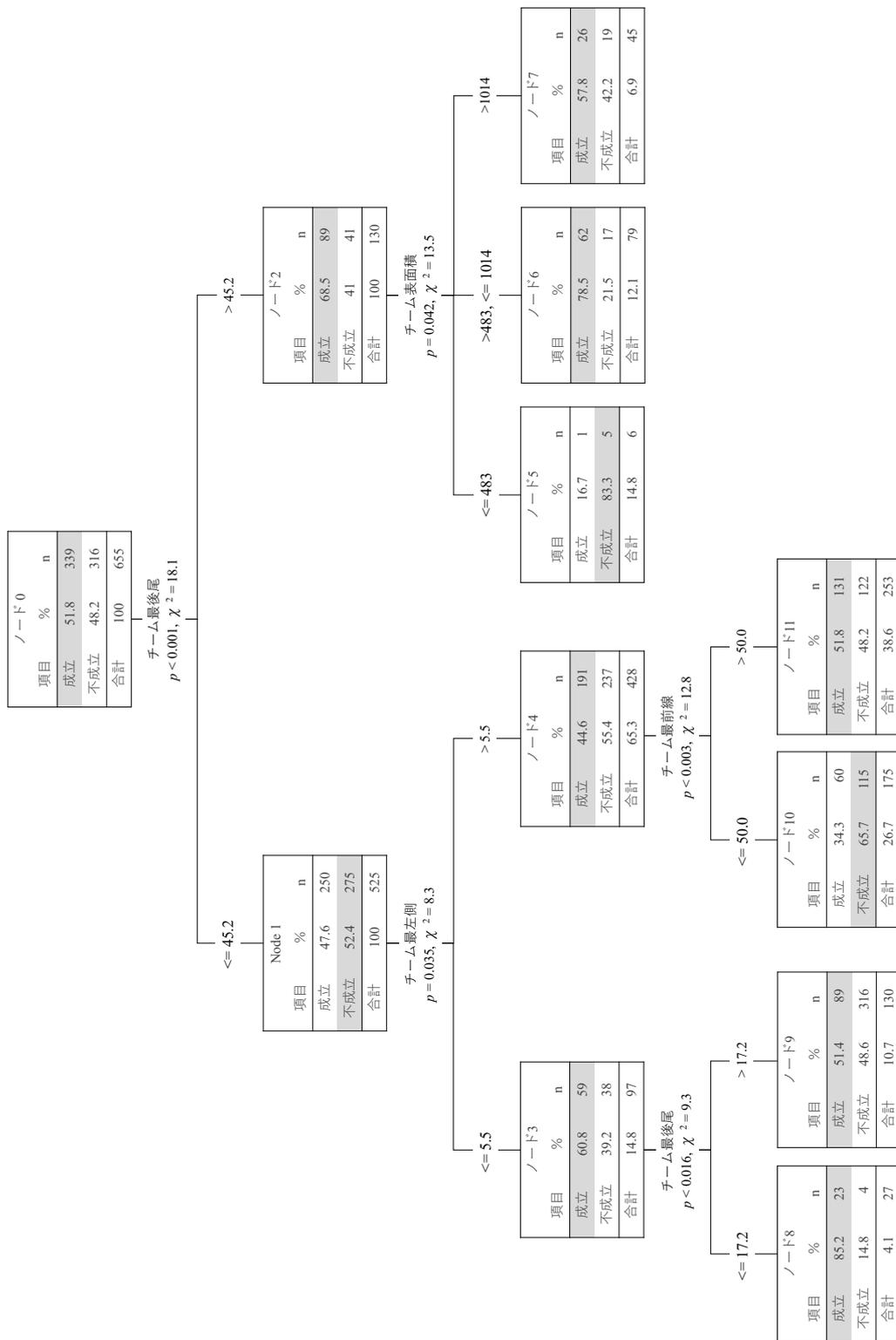


図3. トランジション成立と不成立のボール奪取時の位置情報指標の決定木分析

## 第4章

### トランジションを成立させるための守備最終局面の位置情報解析

#### 4.1 解析方法

##### 4.1.1 解析対象

対象としたチームは、明治安田生命 J2 リーグに所属するプロサッカーチームであった。対象試合は、明治安田生命 J2 リーグ公式試合の 2022 年の第 1 節から第 42 節のホーム戦、全 21 試合のうち、トラッキングデータ取得不良であった 1 試合を除外した 20 試合であった。基礎データは、各試合における GK を除く、先発 10 名と控え 6 名のフィールドプレイヤーの背中に装着された GPS デバイス (Vector X7, Catapult, Australia) により取得された 10 Hz の緯度経度データとした。対象区間は、前後半の 90 分間 (アディショナルタイムを含む) とした。本研究で用いた GPS デバイスの精度と再現性は、先行研究で保証されている。本デバイスは、FIFA の承認を受けており、得られた位置情報の誤差範囲は 50 cm 以内である。Ellens らは、本研究で使用した GPS と 光学式トラッキングシステム (TRACAB, Chyronhego, USA) のシステム間の互換性を判断するため、総移動距離、高速走行距離 (19.8 ~ 25.2 km/h)、スプリント距離 (> 25.2 km/h)、最高速度を比較した結果、GPS と光学式トラッキングシステムは、非常に強い正の相関 ( $r > 0.72$ ) があることを確認した (Ellens, et al., 2021)。したがって、本デバイスは本研究での使用に可能な範囲であることが確認されている。

##### 4.1.2 解析方法

第 3 章と同様に、取得した選手の 10 Hz の緯度経度データの処理およびビデオ撮影によるプレー状況を評価した。さらに、プレー局面も Lago の先行研究の方法に従い、攻撃局面、守備局面、アウト・オブ・プレー局面に分類した (Lago, 2009)。

前章で説明したトランジションの評価アルゴリズムを用いてトランジションの成否を評価した。

##### 4.1.3 統計処理

算出した位置情報の結果は、試合毎に平均値と標準偏差を算出し、対象とした全 20 試合での平均値 ± 標準偏差で示した。攻撃局面、守備局面、アウト・オブ・プレーの間の比較は、

対応のない一元配置分散分析を用いて主効果を検討し、主効果が認められた場合は、ボンフェローニの多重比較を行った。また、トランジション成立時と不成立時の3秒前、2秒前、1秒前およびボール奪取時の位置情報指標値の比較およびボール奪取時と3秒前、2秒前、1秒前の位置情報指標との変化量の比較は、二元配置分散分析（反復測定）を用いて主効果を検討し、その後の検定として、成立・不成立間の比較は対応のないt検定を行い、時間間の比較はボンフェローニの多重比較を行った。全ての統計解析は、統計解析ソフト（SPSS Statistics Version 28.0, IBM, USA）を使用した。統計学的有意水準は5%とした。

## 4.2 結果

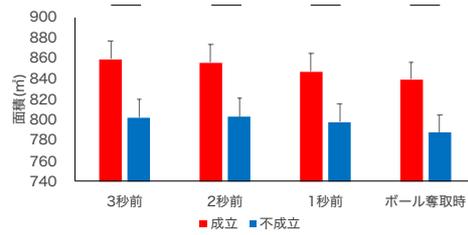
### 4.2.1 3秒前、2秒前、1秒前およびボール奪取時の位置情報指標

図4に対象とした20試合のトランジション成立時と不成立時におけるボール奪取時の3秒前、2秒前、1秒前およびボール奪取時の位置情報指標の比較結果を示した。チーム凸面積、チーム縦幅、チーム最前線、チーム最後尾、チーム横幅のすべての時点での成立・不成立間は、成立時に比して不成立時の方が有意に低かった。また、チーム最前線とチーム最後尾は、時間経過に伴い有意に低くなった。チーム横幅の成立時は、3秒前時点と2秒前時点に比してボール奪取時点の方が有意に短かった。また、不成立時は時間経過に伴い有意に短くなった。チーム最右側の成立・不成立間は有意差がなかった。チーム最左側のボール奪取時と1秒前での成立・不成立間は、成立時に比して不成立時の方が有意に長かった。さらに、チーム最左側の不成立時は時間経過に伴い有意に長くなった。

図5に決定木の結果を示した。最もP値の小さい説明変数「チーム最後尾」がこの分割ステップの基準変数に採択された。この分割ステップで、チーム最後尾が46.4 mより高い方がトランジション成立率の高いことが判明した。チーム最後尾が15.1 m以下のサブセット分割では、分割のための説明変数には「チーム最左側」が採択され4分割された。チーム最左側の5.4 m以下は、最も成立率（84.0%）が高かった。順に18.5～24.4 mの場合で成立率（64.7%）、24.4 mより長い場合で成立率（21.1%）、5.4～18.5 mの場合で成立率（18.0%）であった。チーム最後尾が46.4 mより高い場合のサブセット分割では、分割のための説明変数には「チーム最左側」が採択され3分割された。チーム最左側の21.3 m以下は、最も成立率（74.4%）の高いことが判明した。順に24.4 mより長い場合で成立率（70.0%）、21.3～24.4 mの場合で成立率（0.0%）であった。この結果から守備最終局面3秒前での位置情

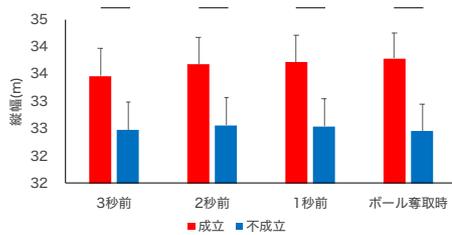
報指標では、チーム最後尾が最もトランジション成立に影響を及ぼし、続いてチーム最左側が影響を及ぼしていることが分かった。各項目の分岐値に注目すると、チーム最後尾が 15.1 m 以下で、チーム最左側の 21.3 m 以下であることがトランジション成立の要因であることが示唆された。

交互作用 :  $p = 0.997$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.752$



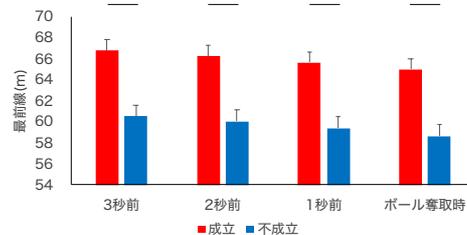
(a) チーム凸面積

交互作用 :  $p = 0.990$ , 成否の主効果 :  $p = 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.987$



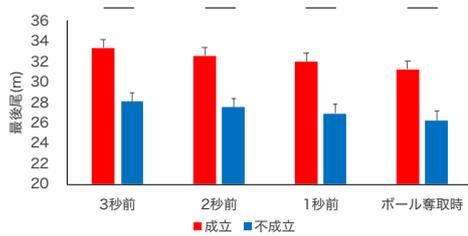
(b) チーム縦幅

交互作用 :  $p = 1.000$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.322$



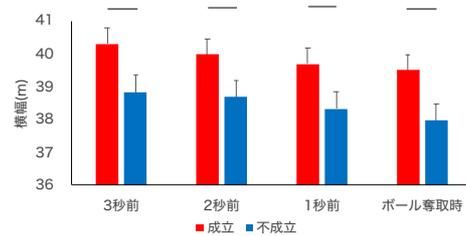
(c) チーム最前線

交互作用 :  $p = 0.999$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.125$



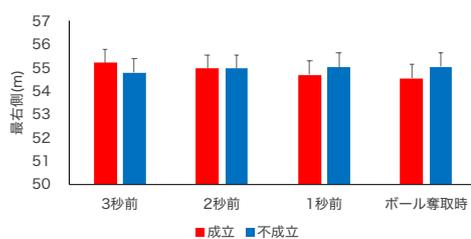
(d) チーム最後尾

交互作用 :  $p = 0.995$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.379$



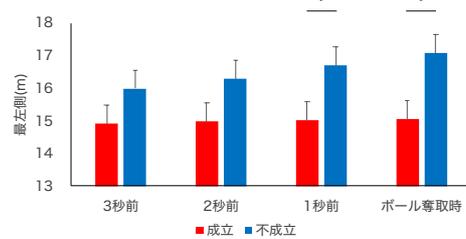
(e) チーム横幅

交互作用 :  $p = 0.884$ , 成否の主効果 :  $p = 0.806$ , 時間の主効果 :  $p = 0.984$



(f) チーム最右側

交互作用 :  $p = 0.840$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.722$



(g) チーム最左側

\* トランジション成立に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>a</sup> 3秒前に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ),  
<sup>b</sup> 2秒前に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>c</sup> 1秒前に対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

図4. トランジション成立時と不成立時におけるボール奪取時の3秒前, 2秒前, 1秒前およびボール奪取時の位置情報指標の比較

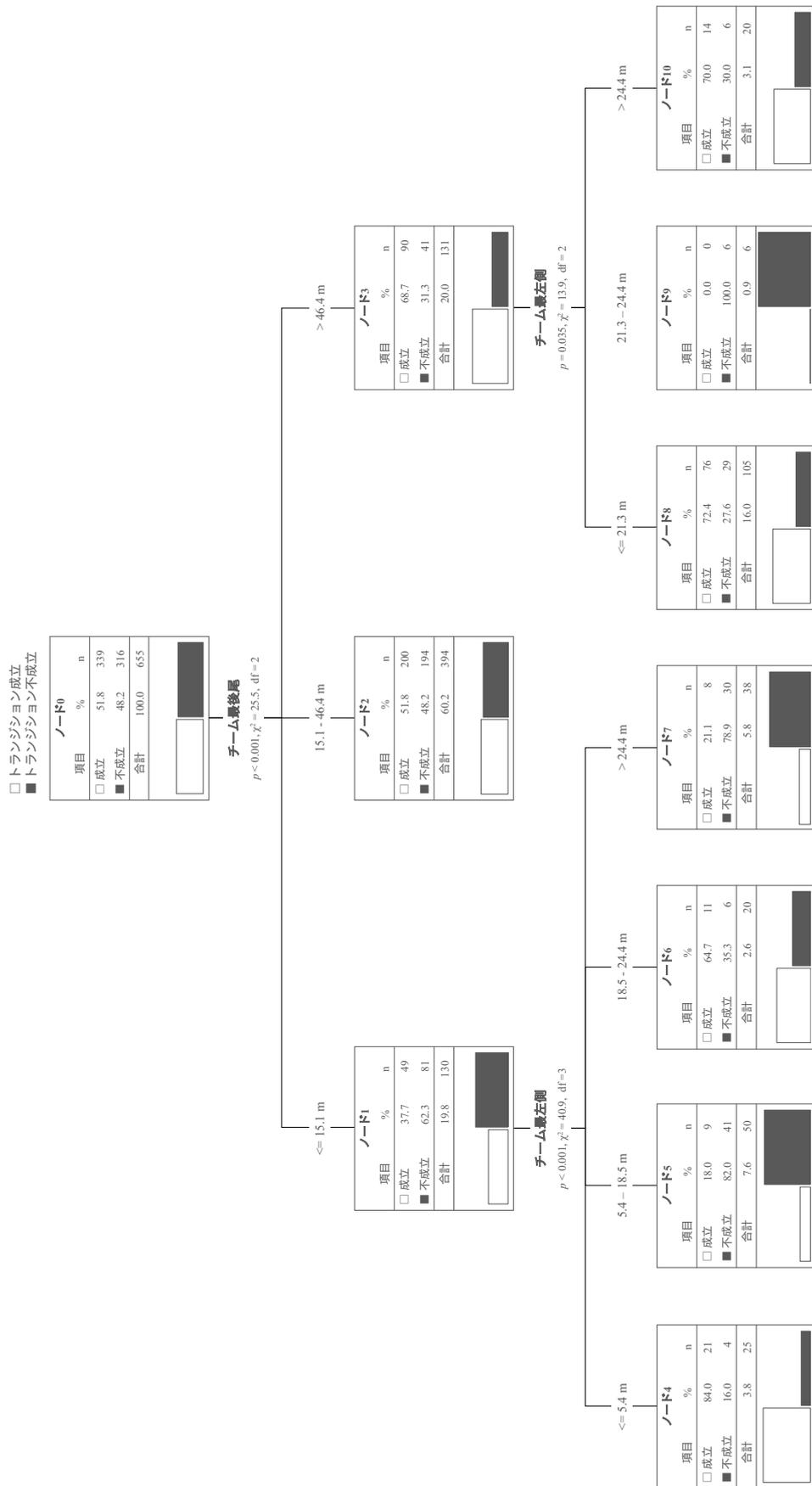


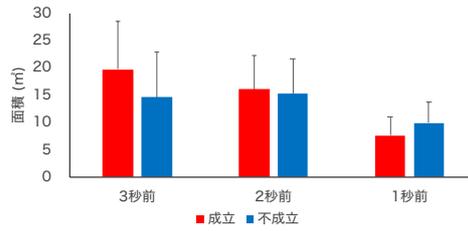
図5. トランジション成立と不成立のボール奪取3秒前の位置情報指標の決定木分析

#### 4.1.2 ボール奪取時と3秒前, 2秒前, 1秒前の位置情報指標値との変化量

図6に対象とした20試合のトランジション成立時と不成立時におけるボール奪取時と3秒前, 2秒前, 1秒前の位置情報指標との変化量の比較結果を示した。チーム凸面積の成立時は, 2秒前との変化量に比して1秒前との変化量の方が有意に小さかった。チーム最前線とチーム最後尾の変化量は, 成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に小さくなった。チーム横幅の変化量は, 成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に小さくなった。また, チーム横幅の不成立時は2秒前時点との変化量に比して1秒前時点との変化量の方が有意に小さかった。チーム最右側の成立時の変化量は, 時間経過に伴い有意に小さくなった。チーム最左側の変化量のすべての時点での成立・不成立間は, 成立時に比して不成立時の方が有意に小さかった。また, チーム最左側の不成立時の変化量は, 時間経過に伴い有意に大きくなった。

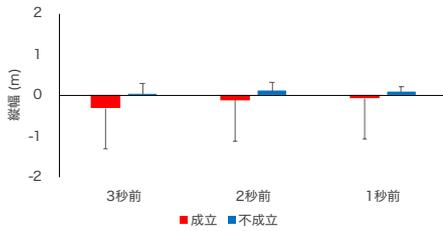
図7に決定木の結果を示した。最もp値の小さい説明変数「チーム最右側」がこの分割ステップの基準変数に採択された。この分割ステップで, チーム最右側が3.4mより長い方がトランジション成立率の高いことが判明した。チーム最右側が3.4m以下のサブセット分割では, 分割のための説明変数には「チーム最左側」が採択され2分割された。チーム最左側の4.7mより長い場合は, 最も成立率(76.7%)の高いことが判明した。また, チーム最左側が4.7mより長い場合のサブセット分割では, 分割のための説明変数には「チーム最右側」が採択され2分割された。チーム最右側の0.6m以下は, 最も成立率(100.0%)の高いことが判明した。0.6mより長い場合で成立率(56.2%)であった。この結果から守備最終局面3秒前での位置情報指標の変化量では, チーム最右側が最もトランジション成立に影響を及ぼし, 続いてチーム最左側が影響を及ぼしていることが分かった。各項目の分岐値に注目すると, チーム最右側が3.4m以下で, チーム最左側の4.7mより長く, チーム最右側が0.6m以下であることがトランジション成立に必要であることが示唆された。

交互作用 :  $p = 0.842$ , 成否の主効果 :  $p = 0.817$ , 時間の主効果 :  $p = 0.383$



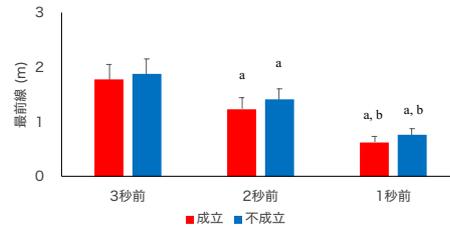
(a) チーム凸面積

交互作用 :  $p = 0.909$ , 成否の主効果 :  $p = 0.165$ , 時間の主効果 :  $p = 0.703$



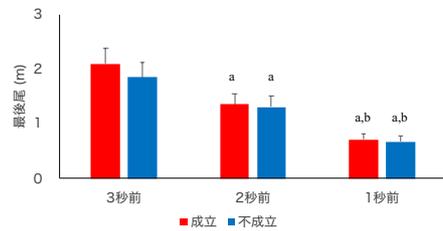
(b) チーム縦幅

交互作用 :  $p = 0.988$ , 成否の主効果 :  $p = 0.421$ , 時間の主効果 :  $p < 0.001$



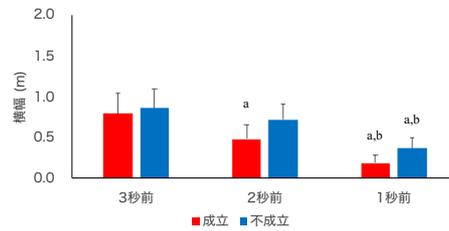
(c) チーム最前線

交互作用 :  $p = 0.844$ , 成否の主効果 :  $p = 0.505$ , 時間の主効果 :  $p < 0.001$



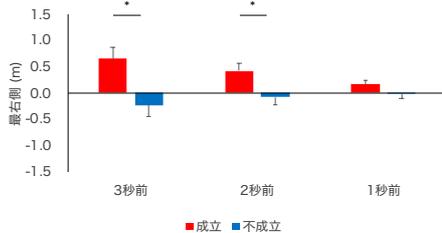
(d) チーム最後尾

交互作用 :  $p = 0.901$ , 成否の主効果 :  $p = 0.283$ , 時間の主効果 :  $p = 0.013$



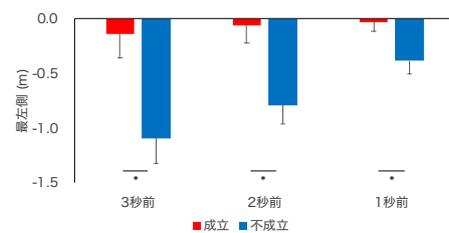
(e) チーム横幅

交互作用 :  $p = 0.077$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.667$



(f) チーム最右側

交互作用 :  $p = 0.216$ , 成否の主効果 :  $p < 0.001$ , 時間の主効果 :  $p = 0.063$



(g) チーム最左側

\* トランジション成立に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ), <sup>a</sup> 3秒前に対して有意差あり ( $p < 0.05$ ),  
<sup>b</sup> 2秒前に対して有意差あり ( $p < 0.05$ )

図6. トランジション成立時と不成立時におけるボール奪取時の3秒前, 2秒前, 1秒前およびボール奪取時の位置情報指標の変化量の比較

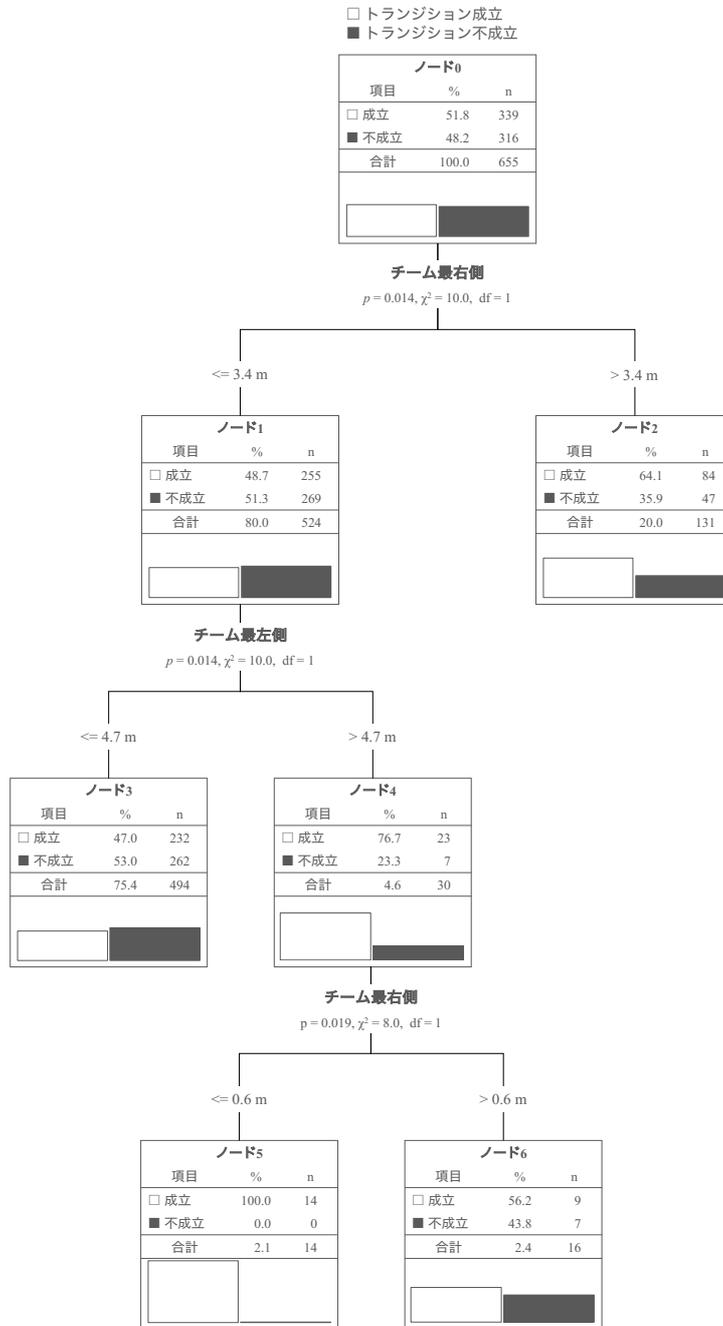


図7. トランジション成立と不成立のボール奪取時から3秒前の位置情報指標の変化量の決定木分析

## 第5章

### 結 論

#### 5.1 本研究の結果のまとめ

第2章はプロサッカーの公式試合において、プレー状況とプレーエリアが10人のフィールドプレイヤーで構成されるチーム凸面積に与える影響を明らかにすることを目的とした。チーム凸面積は、プレー状況だけでなく、プレーエリアにも関連しているという仮説を検証した。その結果、チーム凸面積はプレー状況とプレーエリアの間に有意な交互作用が示された ( $p < 0.001$ )。チーム凸面積は、ディフェンシブサードは攻撃時のチーム凸面積に比して、守備時のチーム凸面積の方が有意に低く、ミドルサードも攻撃時のチーム凸面積に比して、守備時のチーム凸面積が有意に低かった。今回の検証結果から、チーム凸面積はプレー状況だけでなく、プレーエリアにも影響を受ける可能性が示唆された。

第3章は選手の位置情報からトランジションを成立させる要因を明らかにすることを目的とした。その結果、守備局面のチーム凸面積は、攻撃局面に比して狭く、守備局面のチーム縦幅と横幅は、攻撃局面に比して短かった。また、トランジション成立時のボール奪取時のチーム凸面積は不成立のそれに比して有意に広がった。ボール奪取時のチーム縦幅はトランジション成立と不成立で有意差はなく、チーム横幅はトランジション成立時の方が不成立時に比して、有意に長かった。ボール奪取時のチーム最前線とチーム最後尾のトランジション成立時は不成立時に比して有意に高かった。ボール奪取時のチーム最右側はトランジション成立と不成立で有意差はなく、チーム最左側はトランジション成立時の方が不成立時に比して、有意により長かった。さらに、決定木分析の結果、チーム最後尾は、トランジション成立の要因の最上位で採択され、次点にチーム凸面積とチーム最左側が採択された。これらの結果から、ボール奪取時の選手の位置情報が攻撃局面時の効率的なトランジションを成立させる説明要因になり得るとの仮説が立証され、ボール奪取時のチーム最後尾の位置がトランジションを成立させる要因であると考えられた。これらは、本研究のオリジナルの知見であり、これまでの直接的かつボールを失った後の素早くかつより相手ゴールに近い位置に加えて、攻撃局面時にトランジションを効率的に成立させる要因を初めて明らかにした。

続けて、第4章は守備から攻撃のトランジションを効率的に成立させる説明要因を分析

するために、GPSで得られた選手の位置情報に基づき、ボール奪取前の守備最終局面の選手の行動を明らかにすることを目的とした。トランジション成立時と不成立時における3秒前、2秒前、1秒前およびボール奪取時の位置情報指標を比較した。その結果、守備最終局面のチーム凸面積とチーム縦幅、チーム最前線、チーム最後尾は、成立時に比して不成立時の方が有意に低く、成立時と不成立時ともにボール奪取時までの時間経過に伴い有意に低くなった。チーム最前線とチーム最後尾、チーム横幅、チーム最右側は、成立時において時間経過に伴い有意に低くなった。チーム最左側の不成立時は、時間経過に伴い有意に高くなった。また、トランジション成立時と不成立時におけるボール奪取時と3秒前、2秒前、1秒前の位置情報指標との変化量を比較した。その結果、チーム凸面積の成立時は、2秒前との変化量に比して1秒前との変化量の方が有意に小さかった。チーム最前線とチーム最後尾の変化量は、成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に小さくなった。チーム横幅の変化量は、成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に小さくなった。また、チーム横幅の不成立時の変化量は、2秒前時点との変化量に比して1秒前時点との変化量の方が有意に低かった。チーム最右側の成立時の変化量は、時間経過に伴い有意に小さくなった。チーム最左側の変化量は、すべての時点での成立・不成立間で、成立時に比して不成立時の方が有意に小さかった。また、チーム最左側の不成立時の変化量は、時間経過に伴い有意に大きくなった。これらの結果から、ボール奪取前の守備最終局面の位置情報指標の数値とその変化量は、トランジションを効率的に成立させる説明要因である可能性を明らかにした。

## 5.2 本研究の結果の妥当性

第2章は、妥当性が示された方法により得られた結果であり、先行研究により支持されるものである。本研究で用いたGPSデバイスは、FIFAで認証されており、RMSDが信頼区間95%以内にあるものである。また、プロ選手の公式戦から得られたチーム凸面積は、攻撃時で、ディフェンシブサードのチーム凸面積が $800 \pm 1551 \text{ m}^2$ 、ミドルサードのチーム凸面積が $989 \pm 125 \text{ m}^2$ 、アタッキングサードのチーム凸面積が $895 \pm 100 \text{ m}^2$ であった。守備時で、ディフェンシブサードのチーム凸面積が $536 \pm 58 \text{ m}^2$ 、ミドルサードのチーム凸面積が $807 \pm 123 \text{ m}^2$ 、アタッキングサードのチーム凸面積が $936 \pm 103 \text{ m}^2$ であった。Moura, et alの先行研究では、攻撃時のチーム凸面積は $905.4 \pm 4.4 \text{ m}^2$ から $1,407.6 \pm 5.5 \text{ m}^2$ の範囲、守備時のチーム凸面積は $773.8 \pm 4.6 \text{ m}^2$ から $1,158.4 \pm 5.5 \text{ m}^2$ の範囲であった。(Moura, et al, 2012)。

本研究の結果の平均値と比較すると、攻撃時は、ディフェンシブサードとアタッキングサードのチーム凸面積は先行研究の範囲を下回ったが、ミドルサードのチーム凸面積は先行研究の範囲内にあった。守備時は、ディフェンシブサードのチーム凸面積は先行研究の範囲を下回っていたが、ミドルサードとアタッキングサードのチーム凸面積は先行研究の範囲内にあった。また、本研究の結果では、ディフェンシブサードとミドルサードについては、先行研究と同様に、攻撃時のチーム凸面積に比して、守備時のチーム凸面積は有意に小さかった。さらに、攻撃時のディフェンシブサードでの時間に比して、守備のディフェンシブサードでの時間は有意に長く、攻撃時のディフェンシブサードのチーム凸面積に比して、守備時のディフェンシブサードが有意に小さいことは合理的である。本研究は、チーム凸面積において、プレー状況とプレーエリアには有意な交互作用があり ( $p < 0.001$ )、さらに、プレー状況間のチーム凸面積の有意差はプレーエリアに影響しており、ディフェンシブサードとミドルサードに限定されていた。守備時では、チーム重心位置が低くなると、チーム凸面積が有意に小さくなっており、守備陣形が自陣ゴールに近づくとつれて、選手が密集することが定量的に示されたと考察する。つまり、チーム凸面積は攻撃時のチーム凸面積に比して、守備時のチーム凸面積が小さくなるだけでなく、そのプレー状況下でのプレーエリアが低くなるとチーム凸面積が小さくなる可能性がある結論した。

本研究の位置情報の測定データの妥当性は、先行研究によって支持される。第一に、本研究は守備局面のチーム凸面積が攻撃局面に比して小さいことを確認した。Moura et al., (Moura et al., 2012)は、攻撃局面と守備局面のピッチ上の選手の広がりの特徴づけるために、本研究と同様の手法でチーム凸面積を調査した。守備局面のチーム凸面積は773~1158 m<sup>2</sup>の範囲で、攻撃局面のチーム凸面積は905~1408 m<sup>2</sup>の範囲に比して有意に小さかったと報告されている ( $p < 0.05$ )。Clemente et al.(Clemente et al., 2013)も同様の結果を報告している。本研究の守備局面と攻撃局面のチーム凸面積の測定結果も先行研究の結果の範囲内にあり、測定データの妥当性は先行研究から支持される。第二に、守備局面のチーム縦幅とチーム横幅は攻撃局面のそれらに比して有意に短いことを確認した。先行研究では、チーム縦幅の長さが27~48 mの範囲であったと報告されている(Castellano et al., 2013, Fradua et al., 2013, Tenga et al., 2015)。イングランド・プレミアリーグでは24~42 mの範囲で、スペイン・リーガエスパニョーラでは26~46 mの範囲であると報告されている(Duarte et al., 2013, Castellano et al., 2015)。また別の先行研究では、チーム横幅は41~48 mの範囲で、

チーム縦幅よりも維持されていたと報告されている (Fradua et al., 2013, Tenga et al., 2015). Castellano et al. (Castellano et al., 2013) は、守備局面のチーム縦幅と横幅が攻撃局面のそれらに比して有意に短いことを報告している。よって、本研究のチーム縦幅とチーム横幅の測定データの妥当性は先行研究から支持される。これらの先行研究の結果から、本研究の位置情報の測定データは、信頼性があり、妥当性のあるデータであることが立証された。

次に、トランジションの成立・不成立時におけるボール奪取時の位置情報については、以下のことが確認できた。まず、トランジション成立時のボール奪取時のチーム凸面積は不成立のそれに比して有意に広がった。ボール奪取時のチーム縦幅はトランジション成立と不成立で有意差はなく、チーム横幅はトランジション成立時の方が不成立時に比して、有意に長かった。ボール奪取時のチーム最前線とチーム最後尾のトランジション成立時は不成立時に比して有意に高かった。ボール奪取時のチーム最右側はトランジション成立と不成立で有意差はなく、チーム最左側はトランジション成立時の方が不成立時に比して、有意により長かった。ボール奪取時のチーム凸面積が広いほど優位にトランジションが成立している理由は、ボール奪取時のチーム縦幅に差がなく、チーム横幅が広がることでチーム凸面積が広がったと推測される。また、ボール奪取時のチーム最前線と最後尾の位置が前方にあり、チーム全体が相手自陣に前進している状況でのボール奪取は、トランジション成立に有効であることが示唆される。先行研究からも、トランジションはピッチ中央のやや相手自陣側の位置で最も頻繁に生じ、ほかのエリアでのトランジションの頻度に比して有意に多いことが明らかにされている (Casal et al., 2016, Barreira et al., 2011)。このことから、ボール奪取時のチーム最前線と最後尾の位置の結果の妥当性が支持される。続いて、チーム最左側に位置している選手が絞り過ぎてしまうと、ボール奪取時に選手間の距離が近く、チーム凸面積が狭いことは、その後の効果的な攻撃局面への移行が行えない状況であると示唆する。従って、チーム全体が相手自陣に前進し、ボール奪取後にパスやドリブルの選択肢を作っておくために、サイドの選手が横幅をとることによって、その空間的なスペース、つまり、ボール奪取時の凸面積が広い方が攻撃に有効なトランジションを成立させる理由であると考えられる。最後に、ボール奪取時のチーム最後尾は、決定木分析によって基準変数であることが確認された。またチーム最後尾が45.2 m以下の場合、チーム最左側が説明変数として、チーム最後尾が45.2 mより高値の場合、チーム凸面積が説明変数であることが確認された。さらにチーム最左側のさらなる分割で、チーム最左側が5.5 m以下の場合、チーム

最後尾が説明変数として、チーム最左側が5.5 mより高値の場合は、チーム最前線が説明変数であることが確認された。Forcher, et al. (Forcher et al., 2022a)は、ボール保持者から相手自陣のゴールラインまでの距離が小さいほど相手守備へのプレッシャーが増加することを報告している。つまり、プレッシャーの増加は、チーム全体として相手陣地に押し込んでいる状況であることが示されている。このことから、トランジションの成立には、ボール奪取時のチーム最後尾の位置が高いことが要因になると解釈できる。

本研究の結論は、攻撃局面時にトランジションを効率的に成立させる要因がボール奪取時のチーム最後尾、すなわち守備の最終ラインであることを示唆する。守備局面のチーム縦幅と横幅が攻撃局面のそれらに比して有意に短いこともサッカーの原則を説明できることが示唆される。別の研究で、Castellano et al., (Castellano et al., 2013)も、対戦相手のレベルの違いによって、トランジション成立のボール奪取時のチーム最前線とチーム最後尾の位置が不成立におけるそれに比して高かったことは、チーム全体がピッチ中央で位置しているときにトランジションが生じることを示唆する。すなわち、トランジション成立は、相手ゴール方向に向かってチーム全体がピッチの高い位置を維持することが効果的であることが考えられる。先行研究では、トランジションの98.8%は自軍プレイヤーらが守備位置にセットされた状態から始まり、そのうちの48.9%がピッチの中央で頻繁に行われることが示されている(Casal et al., 2016)。守備局面でのピッチ中央のやや相手自陣側でのトランジション成立は、攻撃効率を高め、得点機会の頻度に貢献すると結論づけられている(Barreira et al., 2014, Jamil et al., 2019, Hughes and Lovell, 2019)。さらに、チーム最後尾は、トランジション成立の要因であった。この結果は、選手がトランジション成立のために守備の最終ラインの高さを相手自陣に近い位置で維持しようとしている可能性を示唆する。Forcher, et al.(Forcher et al., 2022) は、トランジション成立後に相手ゴールに近づくような効果的なプレーへ移行するためには、ピッチ中央から前方で対戦相手チームのボールを保持する選手とそのボール周辺の選手へのプレッシャーが高いことが重要であると考察している。

### 5.3 本研究の結果の新規性

第2章の成果の新規性は、チーム凸面積について、プレー状況だけでなく、プレーエリアについての関連も検証したことである。先行研究では、プレー状況についてチーム凸面積に差があることは明らかになっていた。Moura, et alは、チーム凸面積について、攻撃時に相

手ゴールヘシュートを行う状況とタックルを受けた状況の比較、守備時に自ゴールヘシュートを打たれた状況とタックルを行なった状況の比較を行なった。その結果、攻撃では、チームがゴールヘシュートを行なったとき ( $898.9 \pm 43.9 \text{ m}^2$ ) に比して、タックルを受けたとき ( $1,059.6 \pm 15.2 \text{ m}^2$ ) の方が有意に高値を示した ( $p < 0.05$ )。守備時では、自ゴールヘシュートを打たれたときのチーム凸面積 ( $1,110.4 \pm 41.7 \text{ m}^2$ ) に比して、チームがタックルを成功させたときのチーム凸面積 ( $920.7 \pm 13.3 \text{ m}^2$ ) の方が有意に低値を示した ( $p < 0.05$ )。すなわち、プレー内容によって、チーム凸面積に変動があることを報告している (Moura, et al, 2012)。

第3章の特徴の一つは、プロサッカー選手の公式戦のデータを用いて分析したことである。我が国のプロサッカー選手の公式戦データの分析結果の学術的論文は極めて限定的であると言わざるを得ない (Ayabe et al., 2021)。本研究は、Jリーグ公式戦20試合について、GPSデバイスから得られる位置情報と映像の解析により、トラジションの成立に貢献するボール奪取時の位置情報の特徴について日本人エリート選手を対象に初めて明らかにした。

本研究で新たに示された知見は、ボール奪取時の選手の位置情報が攻撃局面時の効率的なトランジションを成立させる説明要因になり得、ボール奪取時のチーム最後尾がトランジションを成立させる要因であることである。Hughes and Lovell (Hughes and Lovell, 2019) は、位置情報からボール奪取後にトランジションが生じたエリアが得点機会に与える影響を調査した結果、相手自陣でのトランジションが得点機会につながったことを報告した。同様に Almeida et al. (Almeida et al., 2014) は、勝ったチームのトランジションした位置が、負けたチームのそれに比して、よりピッチ前方でトランジションが生じていたことを明らかにした。Jamil et al. (Jamil et al., 2019) も相手自陣側でのボール奪取によりトランジションの成立の確率が高いことを示した。すなわち、相手自陣に近い高い位置でのボール奪取は、トランジションの成立に効果的な影響を与えることが示唆されている。本研究の知見は、これらの先行研究を補完する。トランジション成立時のボール奪取時の選手の位置は、チーム最後尾の高さが最も影響することが示唆された。最も優良率が高かったパターンでは、チーム最後尾の高さが45.2 mよりも低く、チーム最左側がタッチライン側に寄り、チーム最後尾が17.2 mより高い位置であった。自陣の左サイドに寄った状況で、チーム最後尾がペナルティエリアの高さ付近に位置する状況下がボール奪取後のトランジションが成立している可能性が示唆される。第4章の新規性は、守備最終局面としてボール奪取前の3秒間の選手の動き

を分析した点である。チーム最前線とチーム最後尾は、時間経過に伴い有意に低くなることを確認した。また、チーム最前線の位置とチーム最後尾の位置の変化量は、成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に低くなることを確認した。チーム最前線とチーム最後尾は、縦幅を一定の範囲で保ちながらボール奪取時までの時間経過に伴い、選手はポジションを下げていることが示唆された。また、チーム横幅の変化量は成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に小さくなることを確認した。さらに、チーム最右側の変化量は、守備最終局面での成立時と不成立時の変化量に差がなかった。一方で、不成立時のチーム最左側の変化量は、時間経過に伴い有意に大きくなり、ボール奪取までの時間経過中に内側に移動していることを確認した。すなわち、トランジションの成立時と不成立時は、チーム最左側の内側への動きが寄与している可能性が示唆された。

#### 5.4 効率的なトランジションに関する考察

本研究の結果として、守備局面のチーム凸面積は、攻撃局面のそれに比して低いことを確認した。この結果の妥当性は、MouraらおよびClementeらの先行研究によって支持される (Moura, et al., 2012, Clemente, et al., 2013)。また、縦方向の位置情報指標について、チーム縦幅はすべての時点での成立・不成立間で、成立時に比して不成立時の方が有意に短かった。チーム最前線とチーム最後尾は、すべての時点での成立・不成立間で成立時に比して不成立時の方が有意に高かった。やや相手自陣側のエリアでのトランジションの頻度が他のエリアでのそれに比して有意に多いことが明らかにされていることから、この結果の妥当性が支持される (Casal, et al., 2016, Barreira, et al., 2011)。横方向の位置情報指標について、チーム横幅は成立時・不成立時ともに時間経過に伴い有意に短くなり、チーム最右側の成立時は、時間経過に伴い有意に低くなった。また、チーム最左側はすべての時点での成立・不成立間で、成立時に比して不成立時の方が有意に低く、チーム最左側の不成立時は、時間経過に伴い有意に高くなることを確認した。これらの結果の妥当性として、トランジションの98.8%は自チームの選手らが守備位置にセットされた状態から始まり、そのうちの48.9%がピッチの中央で頻繁に行われることが明らかになっている (Casal, et al., 2016)。

#### 5.5 本研究の限界と課題

成果の限界は、対象区間を前半のみであることが挙げられる。菅らは前後半でのチーム凸面積の分析を行い、試合の得点状況による交代選手や戦術変更によって、前半と後半では違

いが見られるとの報告がなされており、前後半でのチーム凸面積の違いが現れる可能性があるとして示唆した(菅他, 2001)。次に、今回は単独チームの分析であることが挙げられる。戦術も選手も異なる他チームに同様の結果が当てはまるということは考えられない。

## 5.6 今後の展望

本研究を含むサッカーの試合中のデータは、競技力や試合レベルにより異なる。すなわち、本研究がプロサッカー選手の公式試合のデータに基づくことは、本研究のストレングスである。また、このような貴重なデータの解析により得られた結果は、データの普遍性が高く、我が国のフットボールの現場にも活用可能な資料になる。また、スポーツにおけるビッグデータへの工学的・統計的なアプローチは、スポーツ界を盛り上げ、専門家やアナリストへの戦術分析やトレーニングに貢献することが期待される。

選手の位置情報に基づく、サッカーの試合中の守備局面の選手の動きの分析は、未だに多くの課題がある。ここでは2つの観点について述べる。第一に、本研究はチーム全体の位置情報を分析した。選手の戦術的な行動の検討は、チーム、グループ、ダイアド、個人レベルでの分析により、より深い洞察が得られると考えられる。Forcher, et al.(Forcher et al., 2023)は、チーム全体の密集度合いとボールに最も近い5人の選手からなるサブグループを分析した。サブグループでのトランジション成立におけるチーム凸面積は、不成立におけるそれに比して有意に小さいことが報告されている。つまり、ボールに近いエリアでの選手の密集度が高いことは、ボール奪取にとって重要であることが示唆されている。その結論として、選手の戦術的行動の分析はマクロからマイクロレベルまでの分析が必要であることを報告した。第二に、本研究ではボール奪取時のチーム凸面積と選手間の距離をもとに分析した。今後は、ボール奪取時の前後の位置情報の解析や選手の移動速度や加速度の解析を行う必要がある。

第4章では、ボール奪取前3秒間のチーム凸面積と選手間の距離をもとに分析した。より効率的なトランジション成立時の選手の動きの分析を解明するために、次のステップとして、ボール奪取後の攻撃初動局面の位置情報指標の解析を行う必要がある。本研究の課題は、ボール奪取時およびその前後の位置情報指標の関連性の因果関係を検証し、より幅広い守備の戦術的行動に焦点を当て、新たなパフォーマンス指標の重要性を示すことである。

## 参考文献

- Almeida, C. H., Ferreira, A. P., & Volossovitch, A. (2014). Effects of match location, match status and quality of opposition on regaining possession in UEFA Champions League. *Journal of human kinetics, 1*(41), 203-214.
- Ayabe, M., Murai, S., Oyama, T., Kumahara, H., Sunami, S., & Ishizaki, S. (2021). Match activity characteristics in second division of Japanese professional football: Three years of full-season analyses using global navigation satellite system. *Football Science, 18*, 81-91.
- Barreira, D., Garganta, J., & Anguera, M. T. (2011). In search of nexus between attacking game-patterns, match status and type of ball recovery in European Soccer Championship 2008. *Research methods and performance analysis, 226*, 226-237.
- Barreira, D., Garganta, J., Guimaraes, P., Machado, J., & Anguera, M. T. (2014). Ball recovery patterns as a performance indicator in elite soccer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 1*(228), 61-72.
- Bartlett, R., Button, C., Robins, M., Dutt-Mazumder, A., & Kennedy, G. (2012). Analysing team coordination patterns from player movement trajectories in soccer: Methodological considerations. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 12*(2), 398-424.
- Beetz, M., von Hoyningen-Huene, N., Kirchlechner, B., Gedikli, S., Siles, F., Durus, M., & Lames, M. (2009). Aspogamo: Automated sports game analysis models. *International Journal of Computer Science in Sport, 8*(1), 1-21.
- Bradley, P. (2024). 'Setting the Benchmark' Part 1: The Contextualised Physical Demands of Positional Roles in the FIFA World Cup Qatar 2022. *Biology of Sport, 41*(1), 261-270.
- Bradley, P. (2024). 'Setting the Benchmark' Part 2: Contextualising the Physical Demands of Teams in the FIFA World Cup Qatar 2022. *Biology of Sport, 41*(1), 271-278.
- Buchheit, M., & Simpson, B. M. . (2017). Player-tracking technology: half-full or half-empty glass? *International journal of sports physiology and performance, 12*(s2), s2-35.
- Buchheit, M., Allen, A., Poon, T. K., & Modonutti, M. (2014). Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and GPS technologies. *Journal of sports sciences, 32*(20), 1844-1857.
- Buchheit, M., Allen, A., Poon, T. K., Modonutti, M., Gregson, W., & Di Salvo, V. (2014). Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and GPS technologies. *Journal of sports sciences, 32*(20), 1844-1857.
- Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L., & Reilly. (2008). The role of motion analysis in elite

- soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports medicine*, 38, 839-862.
- Casal, C. A., Andujar, M. Á., Losada, J. L., Ardá, T. , & Maneiro, R. (2016). Identification of defensive performance factors in the 2010 FIFA World Cup South Africa. *Sports*, 4, 54.
- Castellano, J., & Casamichana, D. (2015). What are the differences between first and second divisions of Spanish football teams? *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1(15), 135-146.
- Castellano, J., Álvarez Pastor, D., & Blanco Villaseñor, Á. (2013). Análisis del espacio de interacción en fútbol. *Revista de Psicología del Deporte*, 22, 437-446.
- Church, S., & Hughes, M. (1987). Patterns of play in association football – A computerised analysis. *Communication to First World Congress of Science and Football*, (pp. 13-17). Liverpool.
- Clemente, F. M, Couceiro, M. S., Martins, F. M., Mendes, R., & Figueiredo, A. J. (2013). Measuring Collective Behaviour in Football Teams: Inspecting the impact of each half of the match on ball possession. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 3(13), 678-689.
- Clemente, F. M., Martins, F. M., Couceiro, M. S., Mendes, R. S., & Figueiredo, A. J. (2016). Developing a tactical metric to estimate the defensive area of soccer teams: The defensive play area. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 230(2), 124-132.
- Clemente, F. M., Martins, F. M., Mendes, R. S., Couceiro, M. S., & Figueiredo, A. J. (2014). Using collective metrics to inspect spatio-temporal relationships between football players. *South African Journal for Research in Sport*, 2(36), 47-59.
- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of science and Medicine in Sport*, 13(1), 133-135.
- Cummins, C., Orr, R., O'Connor, H., & West, C. (2013). Global Positioning Systems (GPS) and Microtechnology Sensors in Team Sports: A Systematic Review. *Sports Med*, 43, 1025–1042.
- da Costa, I. T., da Silva, J. M. G., Greco, P. J., & Mesquita, I. (2009). Tactical principles of Soccer: concepts and application. *Motriz*, 3(15), 657-668.
- Dellal, A., Lago-Peñas, C., Rey, E., Chamari, K., & Orhant, E. (2015). The effects of a congested fixture period on physical performance, technical activity and injury rate during matches in a professional soccer team. *British journal of sports medicine*, 49(6), 390-394.

- Di Salvo, V., Baron, R., González-Haro, C., Gormasz, C., Pigozzi, F., & Bachl, N. (2010). Sprinting analysis of elite soccer players during European Champions League and UEFA Cup matches. *Journal of sports sciences*, *28*(14), 1489-1494.
- Duarte, R., Araújo, D., Correia, V., Davids, K., Marques, P., & Richardson, M. J. (2013). Competing together: Assessing the dynamics of team–team and player–team synchrony in professional association football. *Human movement science*, *32*(4), 555-566.
- Duarte, R., Araújo, D., Folgado, H., Esteves, P., Marques, P., & Davids, K. (2013). Capturing complex, non-linear team behaviours during competitive football performance. *Journal of Systems Science and Complexity*, *1*(26), 62-72.
- Duch, J., Waitzman, J. S., & Amaral, L. A. (2010). Quantifying the performance of individual players in a team activity. *PloS one*, *5*(6), e10937.
- Edgecomb, S. J., & Norton, K. I. (2006). Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian football. *Journal of science and Medicine in Sport*, *9*(1-2), 25-32.
- Ellens, S., Hodges, D., McCullagh, S., Malone, J. J., & Varley, M. C. (2021). Interchangeability of player movement variables from different athlete tracking systems in professional soccer. *Science and Medicine in Football*, 1-6.
- Fernández, D. J., Medina, A., Gómez, M. A., & Gavaldá, R. (2016). From Training to Match Performance: A Predictive and Explanatory Study on Novel Tracking Data. *2016 IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops* (pp. 136-143). Barcelona, Spain: ICDMW.
- FIFA. (2018). *FIFA Technical Study Group publishes 2018 FIFA World Cup Russia report*.
- FIFA. (2023, 10 11). *Electronic Performance & Tracking Systems*. Retrieved from FIFA official site: <https://www.fifa.com/technical/football-technology/standards/epts>
- FIFA. (2023, 6 1). *Enhanced Football Intelligence Explanation Document*. Retrieved from FIFA official site: <https://www.fifatrainingcentre.com/en/fifa-to-introduce-enhanced-football-intelligence-at-fifa-world-cup-2022.php>
- Folgado, H., Duarte, R., Fernandes, O., & Sampaio, J. (2014). Competing with lower level opponents decreases intra-team movement synchronization and time-motion demands during pre-season soccer matches. *PloS one*, *9*(5), e97145.
- Folgado, H., Lemmink, K. A., Frencken, W., & Sampaio, J. (2014). Length, width and centroid distance as measures of teams tactical performance in youth football. *European journal of sport science*, *14*(s1), S487-S492.
- Forcher, L., Altmann, S., Forcher, L., Jekauc, D., & Kempe, M. (2022a). The use of player tracking data to analyze defensive play in professional soccer-A scoping review.

- International Journal of Sports Science and Coaching*, 6(17), 1567-1592.
- Forcher, L., Forcher, L., Altmann, S., Jekauc, D., & Kempe, M. (2022b). The keys of pressing to gain the ball-Characteristics of defensive pressure in elite soccer using tracking data. *Science and Medicine in Football*, 1-9.
- Forcher, L., Forcher, L., Altmann, S., Jekauc, D., & Kempe, M. (2023). Is a compact organization important for defensive success in elite soccer?—Analysis based on player tracking data. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 17479541231172695.
- Fradua, L., Zubillaga, A., Caro, Ó., Iván Fernández-García, Á., Ruiz-Ruiz, C., & Tenga, A. (2013). Designing small-sided games for training tactical aspects in soccer: Extrapolating pitch sizes from full-size professional matches. *Journal of sports sciences*, 6(31), 573-581.
- Frencken, W., Lemmink, K., Delleman, N., & Visscher, C. (2011). Oscillations of centroid position and surface area of soccer teams in small-sided games. *European journal of sport science*, 11(4), 215-223.
- Frencken, W., Poel, H. D., Visscher, C., & Lemmink, K. (2012). Variability of inter-team distances associated with match events in elite-standard soccer. *IJ*(30), 1207-1213.
- Garganta, J. (1997). Modelação Táctica do jogo de Futebol: Estudo da Organização da fase Ofensiva em Equipas de alto Rendimento. Doctoral dissertation, University of Porto, Porto.
- Gonçalves, B. V., Figueira, B. E., Maças, V., & Sampaio, J. (2014). Effect of player position on movement behaviour, physical and physiological performances during an 11-a-side football game. *Journal of sports sciences*, 32(2), 191-199.
- Grehaigine, J. F., Bouthier, D., & David, B. (1997). Dynamic-system analysis of opponent relationships in collective actions in soccer. *Journal of sports sciences*, 2(15), 137-149.
- Grunz, A., Memmert, D., & Perl, J. (2012). Tactical pattern recognition in soccer games by means of special self-organizing maps. *Human movement science*, 31(2), 334-343.
- Hoppe, M. W., Baumgart, C., Polglaze, T., & Freiwald, J. (2018). Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PloS one*, 13(2), e0192708.
- Hughes, M., & Lovell, T. (2019). Transition to attack in elite soccer. *Journal of Human Sport & Exercise*, 1(14).
- J-League. (2022, 12 1). *Results of J2-League matches in 2022*. Retrieved from J-League official site: <https://www.jleague.jp/match>
- Jackson, B. M., Polglaze, T., Dawson, B., King, T., & Peeling, P. (2018). Comparing global positioning system and global navigation satellite system measures of team-sport

- movements. *International journal of sports physiology and performance*, 13(8), 1005-1010.
- Jamil, M. (2019). A case study assessing possession regain patterns in English Premier League Football. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6(19), 1011-1025.
- Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A. J., Boyd, L. J., & Aughey, R. J. (2010). Variability of GPS units for measuring distance in team sport movements. *International journal of sports physiology and performance*, 5(4), 565-569.
- Joseph, A., Fenton, N. E., & Neil, M. (2006). Predicting football results using Bayesian nets and other machine learning techniques. *Knowledge-Based Systems*, 19(7), 544-553.
- Klemp, M., Wunderlich, F., Memmert, D. (2021). In-play forecasting in football using event and positional data. *Scientific Reports*, 11(1), 24139.
- Lago, C. (2009). The influence of match location, quality of opposition, and match status on possession strategies in professional association football. *Journal of sports sciences*, 13(27), 1463-1469.
- Larsson, P. (2003). Global positioning system and sport-specific testing. *Sports Med*, 33, 1093–1101.
- Lepschy, H., Woll, A., & Wäsche, H. (2021). Success factors in the FIFA 2018 world Cup in russia and FIFA 2014 world Cup in Brazil. *Frontiers in psychology*, 12, 638690.
- Linke, D., Link, D., & Lames, M. (2018). Validation of electronic performance and tracking systems EPTS under field conditions. *PloS one*, 13(7), e0199519.
- Linke, D., Link, D., & Lames, M. (2020). Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems. *PLoS One*, 15(3), e0230179.
- Low, B., Coutinho, D., Gonçalves, B., Rein, R., Memmert, D., & Sampaio, J. (2020). A systematic review of collective tactical behaviours in football using positional data. *Sports Medicine*, 50(2), 343-385.
- Low, B., Rein, R., Raabe, D., Schwab, S., & Memmert, D. (2021). The porous high-press? An experimental approach investigating tactical behaviours from two pressing strategies in football. *Journal of Sports Sciences*, 19(39), 2199-2210.
- Mackenzie, R., & Cushion, C. . (2013). Performance analysis in football: A critical review and implications for future research. *Journal of sports sciences*, 31(6), 639-676.
- Maleki, M., Dadkhah, K., & Alahvisi, F. (2016). Ball recovery consistency as a performance indicator in elite soccer. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*, 18, 72-81.
- Malone, J. J., Varley, M. C., & Coutts, A. J. (2017). Unpacking the black box: applications and considerations for using GPS devices in sport. *International journal of sports physiology and performance*, 12(s2), s2-18.

- McGarry, T., Anderson, D. I., Wallace, S. A., Hughes, M. D., & Franks, I. M. (2002). Sport competition as a dynamical self-organizing system. *Journal of sports sciences*, *20*(10), 771-781.
- Memmert, D. (2006). *Optimales Taktiktraining im Leistungsfußball*. Balingen, German: Spitta.
- Memmert, D. (2011). *Sports and creativity*. Encyclopedia of creativity, San Diego: Academic Press.
- Memmert, D. (2015). *Teaching tactical creativity in sport*. Research and practice, Abingdon, UK: Routledge.
- Memmert, D., Lemmink, K. A., & Sampaio, J. (2017). Current approaches to tactical performance analyses in soccer using position data. *Sports medicine*, *47*(1), 1-10.
- Mendes, R. S., Malacarne, L. C., & Anteneodo, C. (2007). Statistics of football dynamics. *The European Physical Journal B*, *57*, 357-363.
- Moura, F. A., Martins, L. E. B., & Anido, R. D. O. (2012). Quantitative analysis of Brazilian football players' organisation on the pitch. *Sports biomechanics*, *1*(11), 85-96.
- Moura, F. A., Martins, L. E. B., Anido, R. O., Ruffino, P. R. C., Barros, R. M., & Cunha, S. A. (2013). A spectral analysis of team dynamics and tactics in Brazilian football. *Journal of sports sciences*, *31*(14), 1568-1577.
- Okihara, K., Kan, A., Shiokawa, M., Chul Soon Choi, Deguchi, T., Matsumoto, M., & Higashikawa, Y. (2003). Compactness as a strategy in a soccer game in relation with the change in offence and defense. *World Congress on Science and Football*, *5*, p. 273.
- Passos, P., Davids, K., Araújo, D., Paz, N., Minguéns, J., & Mendes, J. (2011). Networks as a novel tool for studying team ball sports as complex social systems. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *14*(2), 170-176.
- Pena, J. L., & Touchette, H. (2012). A network theory analysis of football strategies. *arXiv preprint arXiv*, 1206.6904.
- Pollard, R., & Reep, C. (1997). Measuring the effectiveness of playing strategies at soccer. *Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician*, *46*(4), 541-550.
- Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R., Impellizzeri, F. M. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International journal of sports medicine*, 1018-1024.
- Reep, C., & Benjamin, B. (1968). Skill and Chance in Association Football. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, *131*(4), 581-585.
- Rein, R., & Memmert, D. (2016). Big data and tactical analysis in elite soccer: future challenges and opportunities for sports science. *SpringerPlus*, *5*(1), 1-13.
- Rico-González, M., Pino-Ortega, J., Nakamura, F. Y., & Varley, M. C. (2020). Past, present,

- and future of the technological tracking methods to assess tactical variables in team sports: A systematic review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 234(4), 281–290.
- Sampaio, J., & Maçãs, V. (2012). Measuring tactical behaviour in football. *International journal of sports medicine*, 395-401.
- Santos, P. M., & Lago-Penas, C. (2019). Defensive positioning on the pitch in relation with situational variables of a professional football team during regaining possession. *Human Movement*, 2(20), 50-56.
- Santos, P., Silva, P. M., & Lago-Peñas, C. (2017). The ball recovery as an action related performance indicator in Football—an example using distinct operational definitions. *Journal of Human Sport and Exercise*, 1(12), 96–105.
- Sarmento, H., Clemente, F. M., Araújo, D., Davids, K., McRobert, A., & Figueiredo, A. (2018). What Performance Analysts Need to Know About Research Trends in Association Football (2012-2016): A Systematic Review. *Sports medicine*, 48(4), 799–836.
- Sathyan, T., Shuttleworth, R., Hedley, M., & Davids, K. (2012). Validity and reliability of a radio positioning system for tracking athletes in indoor and outdoor team sports. *Behavior research methods*, 44, 1108-1114.
- Scott, M. T., Kelly, V. G. (2016). The validity and reliability of global positioning systems in team sport: a brief review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(5), 1470-1490.
- Shen, N., Chen, L., Liu, J., Wang, L., Tao, T., Wu, D., & Chen, R. (2019). A review of global navigation satellite system (GNSS)-based dynamic monitoring technologies for structural health monitoring. *Remote Sensing*, 11(9), 1001.
- Siegle, M., Stevens, T., & Lames, M. (2013). Design of an accuracy study for position detection in football. *Journal of Sports Sciences*, 31(2), 166-172.
- Suzuki, K., & Nishijima, T. (2004). Validity of a soccer defending skill scale (SDSS) using game performances. *International Journal of Sport and Health Science*, 2, 34-49.
- Tenga, A., Zubillaga, A., Caro, O., & Fradua, L. (2015). Explorative study on patterns of game structure in male and female matches from elite Spanish soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1(15), 411-423.
- Toda, K., Teranishi, M., Kushiro, K., & Fujii, K. (2022). Evaluation of soccer team defense based on prediction models of ball recovery and being attacked: A pilot study. *Plos one*, 1(17), e0263051.
- Travassos, B., Davids, K., Araújo, D., & Esteves, T. P. (2013). Performance analysis in team sports: Advances from an Ecological Dynamics approach. *International journal of performance analysis in sport*, 13(1), 83-95.

- Treviño, G. (2014). Trilateración: Sismos, GPS, rayos y teléfonos celulares, y la XIX Olimpiada de Ciencias de la Tierra. *GEOS*, 34(2), 329-343.
- Vallance, E., Sutton-Charani, N., Imoussaten, A., Montmain, J., Perrey, S. (2020). Combining internal-and external-training-loads to predict non-contact injuries in soccer. *Applied Sciences*, 10(15), 5261.
- Vallance, E., Sutton-Charani, N., Imoussaten, A., Montmain, J., & Perrey, S. (2020). Combining internal-and external-training-loads to predict non-contact injuries in soccer. *Applied Sciences*, 10(15), 5261.
- Valter, D. S., Adam, C., Barry, M., & Marco, C. (2006). Validation of Prozone®: A new video-based performance analysis system. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6(1), 108-119.
- Van Gool, D., Van Gerven, D., & Boutmans, J. (1988). The physiological load imposed on soccer players during real match-play. *In Science and Football*, 55-59.
- Vickery, W. M., Dascombe, B. J., Baker, J. D., Higham, D. G., Spratford, W. A., & Duffield, R. (2014). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of sports-specific movement patterns related to cricket, tennis, and field-based team sports. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(6), 1697-1705.
- Vilar, L., Araújo, D., Davids, K., & Bar-Yam, Y. (2013). Science of winning soccer: Emergent pattern-forming dynamics in association football. *Journal of systems science and complexity*, 26, 73-84.
- Winkler, W. (1989). Neue Wege in der Taktikschulung. *Fußballtraining*, 7(4), 46-50.
- 沖原謙, 塩川満久, 菅輝, 柳原英児, 大場渉, 森河亮, 松本光弘. (2001). ゲーム分析における客観データとコーチの印象分析～日本代表 vs UAE 代表戦より～. *サッカー医・科学研究*, 21, 139-142.
- 加藤健太. (2016). サッカーにおけるデータ分析とチーム強化. *通信ソサイエティマガジン*, 37, 29-34.
- 河合一武, 永嶋正俊, 磯川正教, 鈴木滋, 大橋二郎, 松原裕, 福井真司. (1992). サッカーのゲーム分析—コンピュータを利用した即時的分析システムの実用化—. *サッカー医・科学研究会報告書*, 12, 71-75.
- 河合一武, 永嶋正俊, 磯川正教, 鈴木滋, 大橋二郎, 松原裕, ... 福井真司. (1993). サッカーのゲーム分析システムの実用化 (NAS-3) . *サッカー医・科学研究会報告書*, 13, 27-32.
- 後藤泰則. (2022). トラッキングデータを用いたサッカーのゲーム分析. *新潟経営大学紀要*, 28, 87-96.
- 山中邦夫, 五島祐治郎, 西嶋尚彦, ニシジマタカヒコ, 金相謙, 大石三四郎. (1985). サッカーのゲームにおけるチーム力の評価に関する研究 (I). *大学体育研究*, 7, 41-49.

- 菅輝, 沖原謙, 塩川満久, 出口達也, 須佐徹太郎. (2001). ゲーム分析のための新しい指標の構築 - 日本代表 vs. UAE 戦より, 画像解析から得られる基礎データをもとに-. サッカー医・科学研究(Vol. 21), 164-168.
- 大橋二郎, 戸苅晴彦, 磯川正教, 岩村英吉, 深倉和明, 米田浩. (1980). サッカー選手の試合中の移動距離-各年齢層およびポジションごとの比較-. サッカー医・科学研究会報告書, 1, 34-39.
- 大橋二郎, 瀧井敏郎, 大串哲朗. (1983). ストライカーの移動軌跡と移動パターン. サッカー医・科学研究会報告書, 3, 101-107.
- 大橋二郎, 鈴木滋, 大串哲朗, 河合一武. (1987). サッカー選手の試合中における移動スピードの変化と分布. サッカー医・科学研究会報告書, 7, 36-39.
- 大江淳悟, 磨井祥夫, 沖原謙, 塩川満久, 菅輝, 梶山俊仁, 黒川隆志. (2007). サッカーゲームにおける攻撃パフォーマンスの数量化. コーチング学研究, 20(1), 1-14.
- 瀧剛志, 長谷川純一. (1999). サッカー映像からチームワーク分析方法の提案. サッカー医・科学研究, 19, 32-36.
- 内山秀一, 今川正浩, 西野仁, 宇野勝. (1989). コンピュータを導入したサッカーのゲーム分析法. サッカー医・科学研究会報告書, 9, 109-117.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、研究データの提供に関してご支援ご協力して頂きました鈴木徳彦様、氏平裕人様に心より感謝申し上げます。また、本論文の基礎となる論文の執筆において、有益なご助言を頂きました芝浦工業大学工学部 石崎聡之教授ならびに中村学園大学栄養科学部 熊原秀晃教授、東洋大学経済学部 角南俊介准教授には、論文採択に至るまでに多大なるご助力を頂きました。ここに感謝申し上げます。さらに、本研究は、岡山県立大学情報工学部人間情報工学科人間行動学研究室において行われたものです。研究にご協力頂いた本研究室のメンバーに感謝申し上げます。

私の学位取得に対し、ご高配賜りました岡山県立大学情報工学部 穂苅真樹教授ならびに岡山県立大学 犬飼義秀名誉教授に感謝申し上げます。

博士後期課程在学中、業務多忙にもかかわらず本研究の実施にご協力頂き、温かく見守って頂いた岡山県立大学地域創造戦略センター「吉備の杜」推進室の皆様感謝申し上げます。

最後に私が博士後期課程に再入学することに対して、理解と献身的な協力を頂きました妻ならびに家族、両親、兄に感謝申し上げます。

2024年3月

村井 聡紀

## 研究業績

### 学位論文の基礎となる研究業績

#### 原著論文

1. 村井聡紀, 綾部誠也, 大山剛史, 三谷海人, 熊原秀晃, 角南俊介, 石崎聡之: “サッカーのボール奪取時のトランジション成立に対するチーム位置情報の貢献 (Jリーグプロサッカー選手の公式戦の解析)”, 日本機械学会論文集 2023, Vol.89, No.927

#### 口頭発表

1. 村井聡紀, 綾部誠也, 鴨生大樹, 石崎聡之: “プロサッカーの試合でのプレー状況とプレーエリアで区分したフィールドプレーヤーの表面積の解析”, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演論文集, 2021巻, B-3-1, (2021.11)
2. 村井聡紀, 綾部誠也, 大山剛史, 三谷海人, 荻野心, 熊原秀晃, 角南俊介, 石崎聡之: “サッカーの攻撃に繋げるボール奪取のための守備最終局面の位置情報の解析”, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演論文集, 2023巻, B-5-2, (2023.11)

## 研究業績

### 学位論文に直接関与しない研究業績

#### 原著論文

1. Makoto Ayabe, Satoki Murai, Takashi Oyama, Hideaki Kumahara, Shunsuke Sunami and Satoshi Ishizaki : “Match activity characteristics in second division of Japanese professional football: Three years of full-season analyses using global navigation satellite system”, *Football Science*, vol.18, pp. 81-91(2021)
2. Makoto Ayabe, Satoki Murai, Takashi Oyama, Shunsuke Sunami, Hideaki Kumahara and Satoshi Ishizaki : “Interchangeability of sprinting profiles by setting speed threshold of 25 km/h using global navigation satellite system in the Japanese Professional Football League”, *Football Science*, vol.20, pp. 47-52(2023)