

サッカーゲームにおける最小到達時間を用いた優勢地形

Dominant landscape using minimum arrival time at football games

山 本 裕 二*

横 山 慶 子*

木 島 章 文**

Yuji YAMAMOTO*

Keiko YOKOYAMA*

Akifumi KIJIMA**

We developed a new method to clarify the local characteristics of football games using a dominant landscape. The idea is founded on a Voronoi diagram; however, it is calculated using distance between generators. The new method is based on the temporal aspect, and the calculated minimum arrival times to all regions of the football field divided by a square meter for each player. We considered the velocity of the players in each frame by referring to previous research. Then, we calculated the dominant values, which showed how long it would take for each of the six players on the two teams to reach the ball position in every frame. In a successful offensive play, the dominant value of the offensive team was larger than that of the defensive team. This finding implies that momentum, that is, the velocities of offensive players, could be evaluated using this new method.

1 序

複雑に見えるサッカーのようなチームスポーツにおける協調や競合が、自然界で見られる自己組織現象として説明できることが明らかになってきた。例えば、熟達者と初心者の三者の連携の相違は、群論に基づく対称性のHopf分岐理論で説明でき、熟達者の方が対称性の破れの程度は低い(Yokoyama & Yamamoto, 2011)。また、サッカーのゲームにおけるパス行動をネットワークとしてとらえると、大規模ネットワークと同様なベキ則がみられ、ハブ、すなわちチームの中心選手の存在が示唆されるとともに、そのハブが大規模ネットワークと異なり、時間的に変化している(Yamamoto & Yokoyama, 2011)。さらに、選手の位置から勢力範囲を仮定し形成されるチーム間の境界線とボールの時間変化は、非整数ブラウン運動となる(Kijima, Yokoyama, Shima, and Yamamoto, 2014)。これは、自己アフィンフラクタル性を示すとともに、長期時間依存を示すが、その時間は30秒以内である。

しかしながら、これらで明らかになってきたことはサッカーゲームにおける大域的な特徴であり、例えばシュートシーンに至る場面のような局所的な特徴を明

らかにすることはできなかった。この局所的な特徴を明らかにするために有効であると考えられるのが、ボロノイ図(Voronoi diagram)である。ボロノイ図とは、平面上¹の n 個の母点(generator)からなる集合 S に対して、平面上の各点がどの母点に最も近いかで平面を分割した図のことである。そして、母点を含む領域がボロノイ領域(Voronoi region)と呼ばれる。実際のサッカーゲームの一場面をボロノイ図として描いたものが図1である。二つのボロノイ領域の境界をなす線分(図1a)は、ボロノイ辺(Voronoi edge)と呼ばれ、二つの母点の垂直二等分線となる。また3つ以上のボロノイ領域の境界が共有する点(図1b)をボロノイ点(Voronoi point)と呼び、母点はこのボロノイ点を中心とする外接円上に位置する。すなわち、ボロノイ図とは、距離によって領域を分割したものといえる。

このボロノイ図の手法を、サッカーゲームに適用した研究がおこなわれている。Rein, Raabe, Perl, and Memmert (2016)は、ドイツのプロリーグの試合12試合を対象に、パスの開始位置とそのパスの終了位置を、ピッチを3等分した自陣側1/3、中間1/3、敵陣側1/3の3つに分類した。そしてゴール前30mの領域内での各瞬間における攻撃側の領域の大きさを計算し、パスの開始時

* 名古屋大学

** 山梨大学

* Nagoya University

** University of Yamanashi

¹ 3次元空間でも定義できる

と終了時でその大きさを比較している。その結果、敵陣側 1/3、あるいは中間から敵陣側にパスが出た時に攻撃側の領域が大きくなったと報告している。また、Fonseca, Milho, Travassos, and Araújo (2012) は、20メートル四方でのフットサルの実験的なゲームにおいて、攻撃側と守備側のボロノイ領域の時間変化を検討し、攻撃側のボロノイ領域の方が守備側よりも大きく、規則性が高かったことを報告している。つまり、守備側はよりコンパクトに守り、攻撃側に対応していることを示している。さらに、Kim (2004) は、エレクトロニック・アーツ (EA) の FIFA 2003 と呼ばれるコンピューター上のサッカーゲームにボロノイ図を適用し、ボロノイ点の数を問題にしている。

しかしながら、これらの研究ではボロノイ図本来の特徴である、距離による領域分割を用いており、サッカーゲームでの選手の位置を母点とする場合には選手の速度ベクトルを考慮する必要性が早くから指摘されていた (Taki, Hasegawa, & Fukumura, 1996)。以下では、この速度を考慮し、到達時間によって領域を分割する優勢地

形 (dominant landscape) の作成方法を概説する。そして、ボール動態に合せ、ボールの軌道上の優勢値 (dominant value) から、局所的なゲームの特徴を探る試みを紹介する。なお、優勢値とは、各地点における守備側と攻撃側の最小到達時間の差とする。

2 優勢領域の作成手法

2.1 瀧・長谷川 (1998) の方法

瀧ら (Taki et al., 1996; 瀧・長谷川, 1998) では、ある地点への最小到達時間 (minimum moving time) から、優勢領域を計算している。そこでは、速度と加速度からこの最小到達時間を計算している (瀧・長谷川, 2001)。ボロノイ領域が到達距離によって領域を分割するのに対し、ここでは到達時間によって空間を分割すると考える。そして、最小到達時間の計算には、位置と初速度の初期条件に、加速度を加味する。これを模式的に示したのが、図 2 である。

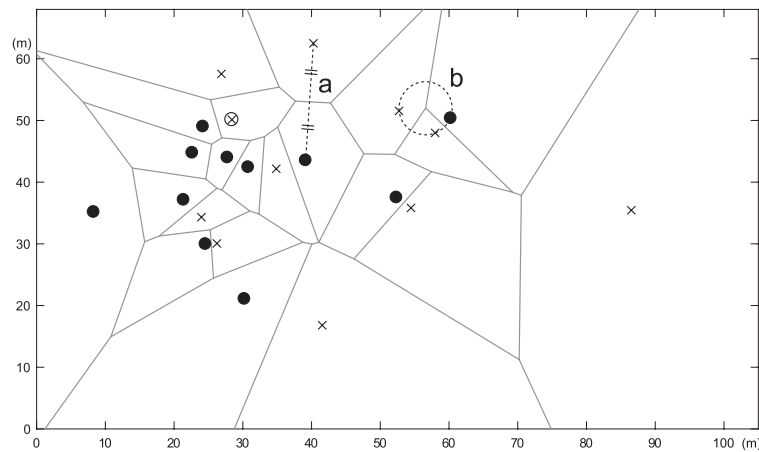


図 1 : サッカーゲームをボロノイ図で描いた例。左上にある白抜きの円がボール位置。

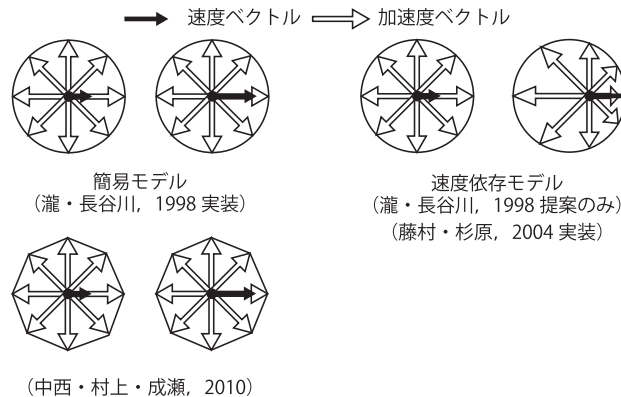


図 2 : 提案された加速度モデル

また、その算出に用いられたのが以下の式1である。

$$\begin{pmatrix} x_\theta^i \\ y_\theta^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} a_{\theta x}^i t^2 + v_x^i t + P_x^i \\ \frac{1}{2} a_{\theta y}^i t^2 + v_y^i t + P_y^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、エージェントの位置が (P_x^i, P_y^i) 、速度が (v_x^i, v_y^i) 、エージェントの θ 方向の加速度 $(a_{\theta x}^i, a_{\theta y}^i)$ の大きさを a_θ^i とする。

2.2 藤村・杉原 (2004) の方法

杉原ら (藤村・杉原, 2004; Fujimura & Sugihara, 2005; 杉原, 2009) は、瀧ら (Taki et al., 1996; 瀧・長谷川, 1998) で提案されていた加速度の速度依存モデルを用いて、実測とともに別の優勢領域の計算方法を示している。

■ **1次元運動モデル** 「人が自力で移動する際には、その運動を打ち消す方向に運動の大きさに比例した力が働く」という仮定を置く。そこで直進走行 (1次元) では以下の運動方程式となる。

$$m \frac{d}{dt} v = F - kv \quad (2)$$

ただし、 m は質量、 F は最大推進力、 k は抗力定数、 v は速度を表し、右辺の第2項が運動を打ち消す力 (摩擦力) を表している。この微分方程式の解は、

$$v = \frac{F}{k} - \left(\frac{F}{k} - v_0 \right) \exp \left(-\frac{k}{m} t \right) \quad (3)$$

と表すことができる。ただし、 v_0 は $t=0$ における v の値である。

この式から $v < F/k$ という関係が成り立つことがわかるので、 v の取りうる最大値を $V_{max} = F/k$ とする。またここで、 $\alpha = k/m$ を用いて書き換えると、

$$v = V_{max} - (V_{max} - v_0) \exp(-\alpha t) \quad (4)$$

が得られる。ただし、 α は抵抗の大きさを表す。

ここで、実測値から $\alpha = 1.3$, $V_{max} = 7.8(m/s)$ としている (藤村・杉原, 2004; Fujimura & Sugihara, 2005)。

■ **2次元運動モデル** 次に、「選手は速度方向に関わらず、すべての方向に対して、等しく最大筋力を発揮できる」と仮定すると、運動モデルを2次元ベクトルを用いて、

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = \vec{F} - k\vec{v} \quad (5)$$

と式2を書き直すことができる。また、 $\vec{F} = F\vec{e}$ (ただし \vec{e} は任意の単位ベクトル) と置いてこの微分方程式を解くと、

$$\vec{x} - \vec{x}_0 = V_{max} \left(t - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \right) \vec{e} + \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \vec{v}_0 \quad (6)$$

ここで、 $t=0$ における位置を x_0 、速度を v_0 とする。

ここで $V_{max} = \frac{F}{k}$ とすると、杉原 (2009, p. 155) のように

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_0 + \frac{F}{k} \left(t - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \right) \mathbf{p} + \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \mathbf{v}_0 \quad (7)$$

ここで $t=0$ における位置 \mathbf{x}_0 、速度 \mathbf{v}_0 であった選手が、その後、方向 \mathbf{p} へ向かって走るとする。したがって、この選手が時刻 t までに到達できる領域は、中心が $\mathbf{x}_0 + \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \mathbf{v}_0$ 、半径が $\frac{F}{k} \left(t - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \right) \mathbf{p}$ の円領域である。そこで、時刻 t で到達できる領域が計算できたら、コート内のすべての位置に対して、どの選手が最も早く到達できるかで優勢領域に分割できる。

2.3 中西・村上・成瀬 (2010) の方法

ロボカップでのチーム戦略を決めるために、実時間計算を行うことを目的として、近似計算手法が考案されている (中西・村上・成瀬; 2010)。基本的には、瀧ら (Taki et al., 1996; 瀧・長谷川, 1998) のアルゴリズムを用いて、 610×420 の座標数に対して、最大加速度ベクトル8方向、到達時間の分割数を10に設定し、到達多角領域を組み合わせてることによって近似優勢領域を計算するものである (瀧ら (Taki et al., 1996; 瀧・長谷川, 1998) の場合の分割数等は不明)。

具体的な手順としては、

- step 1: 到達時間 t を一つ定め、それぞれのエージェントに対して到達多角領域を作成する
- step 2: step 1で作成した2つの到達多角領域に対して重なった領域の分割を行う
- step 3: 到達多角領域が3つ以上重なる場合の分割処理を行い、合成した到達多角領域を求める
- step 4: 複数の到達時間 t_1, t_2, \dots, t_n に対して、合成した到達多角領域を求め、それらを式8より統合して近似優勢領域を求める

$$B_1 \cup (B_2 - B_1) \cup \dots \cup (B_n - \bigcup_{i=1}^{n-1} B_i) \quad (8)$$

この計算方法で、加速度の方向を2048、到達時間分割数を400にすれば、100パーセント再現できたとしている。

3 ボール動態と優勢値

これまでの方法は、コート内を誰かの選手の支配領域として分割することを目的としていたが、ここでは、コート内の各地点の重みづけのために各地点への、各選手の到達時間を計算することを試みる。最終的には、ボールの軌跡がどういった重みづけの地点、すなわち優勢地形を通過して、移動しているかを評価したい。そのために、各選手の各地点への最小到達時間を求める方法として、ここでは杉原ら（藤村・杉原、2004; 杉原、2009）の方法に依拠する。

3.1 方法

3.1.1 材料

国際試合の前半45分のなかで、シュートに至ったシーン1シーン抽出した。このシーンは、Bチームのゴールキックから始まり、27.6秒後にAチームのシュートで終わったシーンである。その間に6回の攻守の切り替えがあり、両チーム合わせて12名の選手がボールタッチしていた（図7参照）。全選手とボールの位置は5 Hzでサンプリングされ、平面上の座標（x, y）として記録されている。

3.1.2 計算方法

■最小到達時間 まず式7に藤村・杉原（2004）の実測した定数、 $\alpha = 1.3$, $V_{max} = 7.8(m/s)$ を入れてみる。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_0 + 7.8 \left(t - \frac{1 - e^{-1.3t}}{1.3} \right) \mathbf{p} + \frac{1 - e^{-1.3t}}{1.3} \mathbf{v}_0 \quad (9)$$

これは、ある時点（ $t = 0$ ）における選手の位置 \mathbf{x}_0 と速度 \mathbf{v}_0 と速度ベクトル \mathbf{p} から、 t 秒後の選手の位置が $\mathbf{x}(t)$ として求められることを意味する。言いかえると、選手が時刻 t までに到達できる領域は、中心が $\mathbf{x}_0 + \frac{1 - e^{-1.3t}}{1.3} \mathbf{v}_0$ 、半径が $7.8 \left(t - \frac{1 - e^{-1.3t}}{1.3} \right) \mathbf{p}$ の円領域である。

そこでまず、コート上を1メートル四方で105×68の7,140ピクセルに分割し、各選手の各フレームでの位置から全ピクセルへの到達時間を計算する。図3は、コート中央の選手（×）が左下のピクセルへ移動するまでの時間を円領域として計算したイメージ図である（実際には0.1秒単位で計算したが、この図は円を見やすくするために0.2秒単位で描いてある）。実際の計算では円は描かず、距離の計算で最小到達時間を求めている。また、ここでは円領域を求めているため速度ベクトルは用いず、速度（スカラー）だけを用いている。この方法で、各シーンについて、全選手の全ピクセルへの最小到達時間を計算した。

ある時点でのある選手のコート上の各点への最小到達時間の分布は図4である。黒がボールで白抜きが選手、速度ベクトルが矢印で示してある。黒い方が最小到達時間が短く、白くなるに従って最小到達時間が長くなることを示している。この図から、選手の位置よりも最小到達時間の分布が、選手の進行方向に広がっていて、進行方向と逆は最小到達時間が進行方向よりも長くなっているのが確認できる。これが速度依存モデルを用いて、速度を考慮した影響で、円の中心が進行方向にずれている。

■最小到達時間から見た優勢領域 全選手について求められたコート上での優勢領域について、各時点でのボールの位置への全選手の最小到達時間を、Aチームがシュートまで至った一つのシーン（27.6秒間）について見たのが図5aである。左からAチーム、Bチームのヒストグラムと両チームのボックスプロットを示してある。平均で5.5～5.7秒でボール位置に到達できることを示している。そして、各時点でのボール位置に近い各チーム4名から6名の最小到達時間の平均を求め、そのヒストグラムとボックスプロット、両チームの到達時間差を示したのが図5bからdである。当然ながら人数が多くなればなるほど、到達時間の平均は長くなっているが、4名から6名の選手を見てもその違いはほとんど見られない。また、両チームの到達時間差のヒストグラムを見ると、これもよく似た分布を示しているが、4名から6名にかけて到達時間差の分布の違いが大きくなっていることがわかる（図5aの右端）

そこである時点でのボールに近い6名の最小到達時間の平均を求めるとし、コート上の各点に対して最小到達時間平均を求めて図示したものが図6a～dである。図6a, cには、全選手の速度ベクトルも示してある。図6b, dは到達時間平均（優勢地形）の算出に用いた各チーム、ボールに近い6名の速度ベクトルのみを示している。これより、攻撃側が守備側よりも縦長に広がっており、守備側の選手がよりまとまっていることがわかる。そして、守備側の到達時間平均から、攻撃側の到達時間平均を引いたものが図6e, fである。白い方が守備側の到達時間が早く、黒い方が攻撃側の到達時間が早いことを示している。Aチームが左から右へ攻撃しているため、左側が黒く、右側が白くなっているのが確認できる。

なお、これらのプログラムはMATLAB R2017bを用いて書かれた（<https://nuss.nagoya-u.ac.jp/index.php/s/1h0v4Jn8duK5BJT>）。

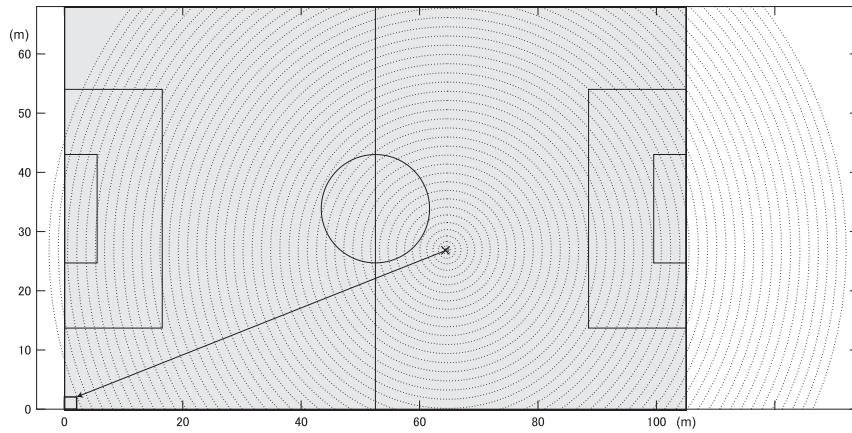


図 3：ある時点のある選手の位置から各ピクセルへの最小到達時間を計算する円領域のイメージ図。

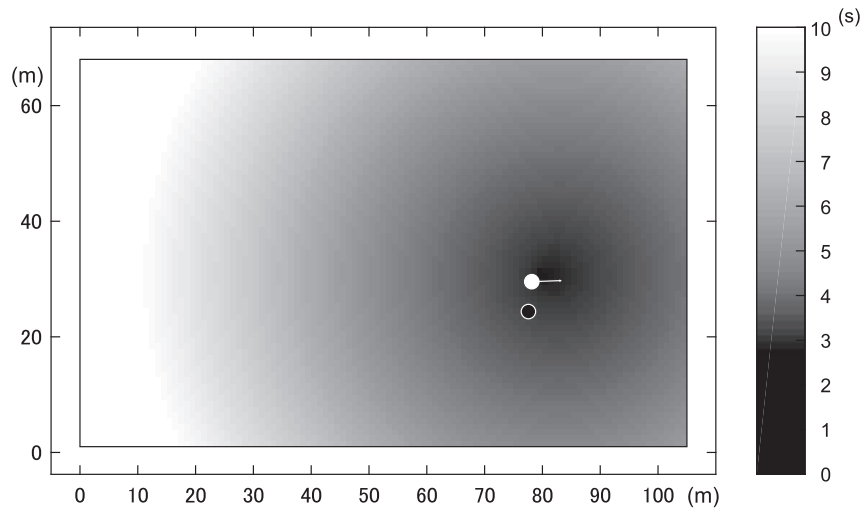


図 4：ある時点のある選手のコート上の各点への最小到達時間の分布。黒がボールで、白抜きが選手の位置。

3.2 優勢値の変化

あるシーンでのコート上のボールの軌道と、ボールに近い各チーム 6 名の選手の最小到達時間平均の差(守備側から攻撃側を引いたもの)、ボールの移動角度を表したものが図 7 である。図 7b では、プラスの部分は守備側の優勢値が高い部分を、逆にマイナスでは攻撃側の優勢値の高い部分をボールが移動していることを示す。また図 7c に示す、そのときのボールの移動角度は、ゴール方向が 0 度あるいは 180 度、横方向が 90 度になるように求めている。図 7b, c における縦線は、ボールタッチの切り替わりを示し、横線の上はボールキープ時を、下側はパス時を示している。したがって、図 7c のボールの移動角度はパスの時にはパスの出だしから到達まで同じ角度になるようになっている。なお、このシーンの

各チームの優勢地形、ボール軌道上の優勢値の変化は <https://nuss.nagoya-u.ac.jp/index.php/s/nit53GtEE3Zy79g> に動画としておいてある。

この優勢値の時間変化を見ると、シュート直前で攻撃側の優勢値が高いところをボールが通っていることが分かる。図 6b, d を見ると、攻撃側 (A チーム) の速度ベクトルが、守備側 (B チーム) の速度ベクトルよりも大きい (A: 3.496, B: 2.565)。つまりシュート直前で、攻撃側が守備側ゴールに向かって速い速度で移動していることが、優勢値が攻撃側のほうが守備側よりも高くなった原因であると考えられる。言いかえれば、ボールに近い 6 名の選手のボールあるいはゴール方向の速度によって、優勢地形が変化することを示唆している。

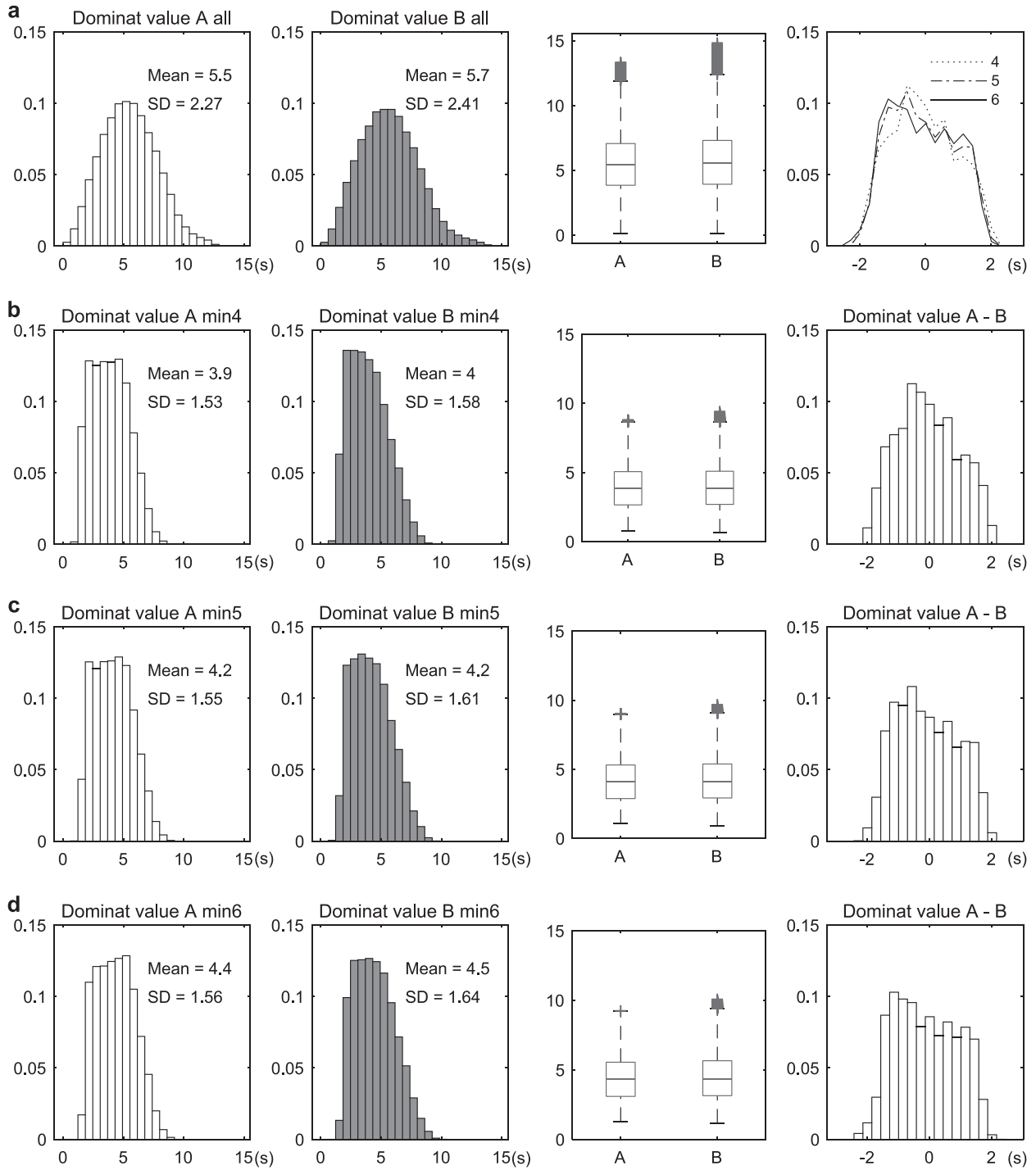


図 5 : 各チームの全選手 (a)、ボールに近い 4 名 (b)、5 名 (c)、6 名 (d) の最小到達時間平均のヒストグラムとボックスプロット、および両チームの到達時間差。

サッカーゲームにおける最小到達時間を用いた優勢地形

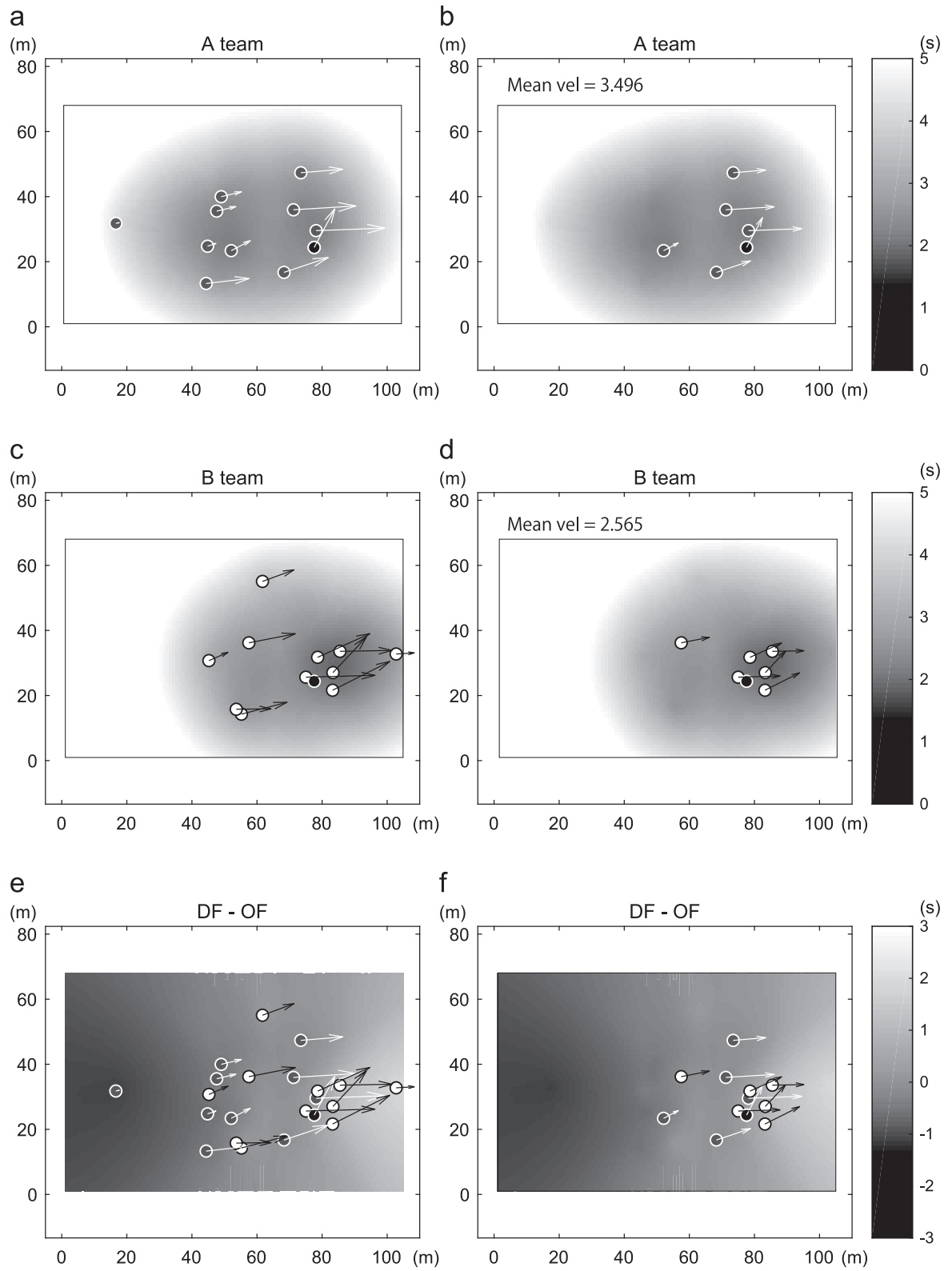


図6：ボールに近い6名の選手の最小到達時間の平均（a～d）と、守備側と攻撃側の最小到達時間平均の差（e, f）。a, c, dには選手全員の速度ベクトルが、b, d, fには優勢地形の計算に用いたボールに近い6名の速度ベクトルのみを示している。

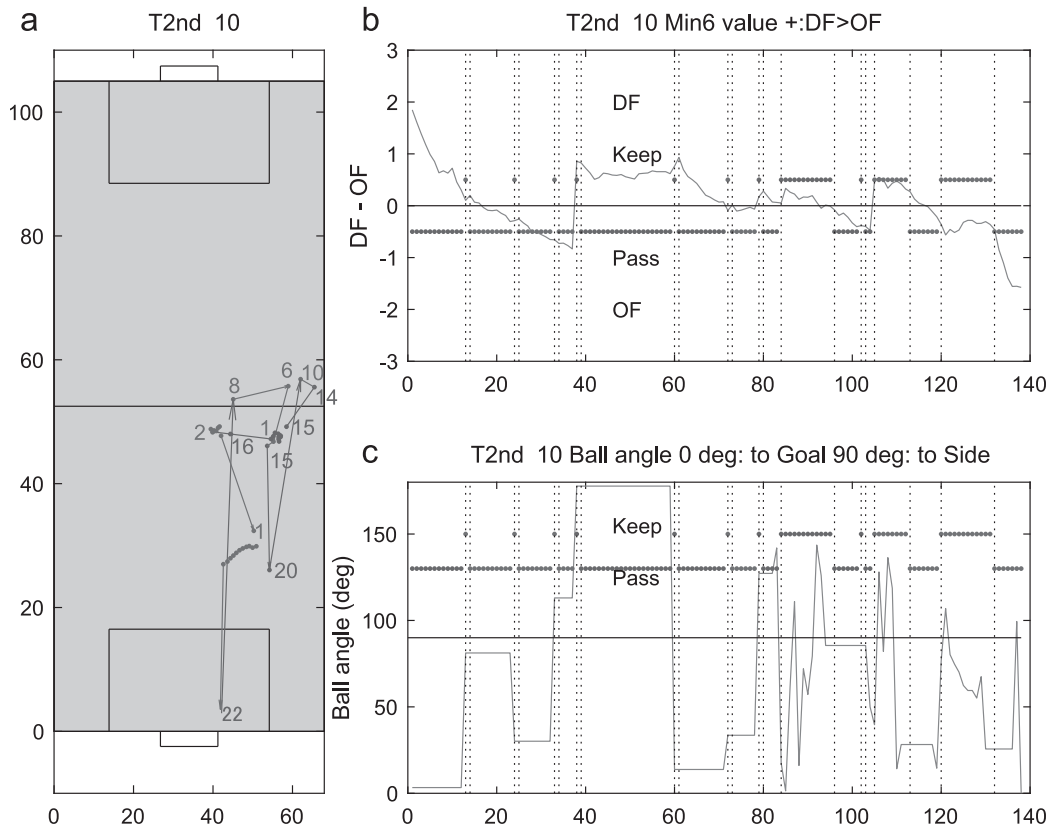


図7：コート上のボールの軌道 (a)、ボールに近い6名の最小到達時間平均の差 (b)、ボールの移動角度 (c)。b, c における縦線はボールタッチの切り替わり。

4 まとめ

本稿では、サッカーゲームの局所的な特徴を記述するために、ボロノイ図を参考に、各選手の色度ベクトルを考慮して、ある地点への最小到達時間によって求められる優勢領域を求め、特にボール位置の優勢値、すなわち守備側の優勢値から攻撃側の優勢値を引いたものを指標とすることを試みた。この最小到達時間のアルゴリズムは、瀧ら (Taki et al., 1996; 瀧・長谷川, 1998) の発想を実装した杉原ら (藤村・杉原, 2004; Fujimura & Sugihara, 2005; 杉原, 2009) の方法を援用した。

その結果、ボール位置の優勢値が攻撃側と守備側選手の速度を反映したものであることが示唆された。このことは、ゲームの流れのような、局所的なゲームの特徴を記述できる可能性があることを意味する。しかしながら、今回はボールに近い各チーム6名の選手の動きから優勢値を求めたが、何名の選手を考慮すればよいのかも問題となる。

これまでも、Yokoyama & Yamamoto (2010) は選手の位置と速度を用いて、チーム情報場の算出を試みて

いる。そして、この情報場から選手間結合度を定義し、チーム組織性という指標を考案している。このチーム組織性を用いて、ホッケーゲームを対象に、縦パスが成功した場面の特徴を明らかにすることを試みた。これは両チームの相対的な関係から、いわゆる「ゲームの流れ」を明らかにしようとしたものである。今後は、こうした優勢値や情報場の変化の中に規則性があるかどうかを、専門家の判断と合わせながら検討する必要がある。

文 献

- Fonseca, S., Milho, J., Travassos, B., & Araujo, D. (2012). Spatial dynamics of team sports exposed by Voronoi diagrams. *Human Movement Science*, **31**, 1652–1659.
- 藤村光・杉原厚吉 (2004). 優勢領域に基づいたスポーツチームワークの定量的評価. 『電子情報通信学会論文誌 D-II』, **J87-D-II**, 818–828.
- Fujimura, A. & Sugihara, K. (2005). Geometric analysis and quantitative evaluation of sport teamwork. *Systems and Computers in Japan*, **36**, 49–58.
- Kijima, A., Yokoyama, K., Shima, H., & Yamamoto, Y. (2014).

- Emergence of the self-similarity in football dynamics. *European Physical Journal B*, **87**, 41.
- Kim, S. (2004). Voronoi analysis of a soccer game. *Nonlinear Analysis: Modeling and Control*, **9**, 233–240.
- 中西良太・村上和人・成瀬正 (2010). 集団行動のオンライン解析を目的とした優勢領域の近似計算手法. 『電子情報通信学会論文誌 D』, **J93-D**, 20–28.
- Rein, R., Raabe, D., Perl, J., & Memmert, D. (2016). Evaluation of changes in space control due to passing behavior in elite soccer using Voronoi-cells. In P. Chung, A. Soltoggio, C. W. Dawson, Q. Meng, & M. Pain (Eds.), *Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Science in Sports (ISCSS)*, 179–183. Switzerland: Springer International Publishing.
- 杉原厚吉 (2009). 『なわばりの数理モデル：ボロノイ図からの数理工学入門』. 東京：共立出版.
- 瀧剛志・長谷川純一 (1998). チームスポーツにおける集団行動解析のための特徴量とその応用. 『電子情報通信学会論文誌 D-II』, **J81-D-II**, 1802–1811.
- 瀧剛志・長谷川純一 (2001). 勢力範囲に基づいたチームスポーツ解析. 『情報処理』, **42**, 582–586.
- Taki, T., Hasegawa, J., & Fukumura, T. (1996). Development of motion analysis system for quantitative evaluation of teamwork in soccer games. *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 3, 815–818.
- Yamamoto, Y. & Yokoyama, K. (2011). Common and unique network dynamics in football games. *PLoS ONE*, **6**, e29638.
- Yokoyama, K. & Yamamoto, Y. (2010). Quantification of collective dynamics in ball sports based on visual information. *Nagoya Journal of Health, Physical Fitness & Sports*, **33**, 71–75.
- Yokoyama, K. & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, **7**, e1002181.