

サッカーの試合に於ける占有面積と 選手間ネットワークの次数を用いた混合型指標の開発 青木 優¹⁾

Development of Mixed Type Indices Based on the Occupation Area and the Degree of Players Network in Football Match AOKI Masaru

Abstract

The purpose of this study is to clarify the relationship between mixed type indices, which are based on the occupation area and the degree of players network, and the score difference in football match. We developed the mixed type indices and analyzed the log data of RoboCup Soccer Simulation (RCSS) 2D league. As a result, it was found that the indices can well explain the score difference.

Keywords : Voronoi tessellation, Delaunay network, RoboCup Soccer

I. 緒言

近年、サッカーやバスケットボール等のチームスポーツ競技の分野に於いては、IoTや映像解析技術の発展によって様々なトラッキングデータが記録可能となり、選手のコンディション管理や戦術分析の為のスポーツデータ解析に用いられている。¹⁾ これらチームスポーツ競技の戦術分析を行う際、フォーメーションの分析は重要であり、²⁾ この分析手法として注目されているのが Voronoi 図³⁾ と Delaunay 図⁴⁾ による分析である。

Voronoi 図による分析は、過去に複数の研究報告がされており、例えば、瀧と長谷川⁵⁾ は、チームスポーツ競技の集団行動を理解する為の映像生成の方法として、到達可能時間に基づく優勢領域、つまり Voronoi 図を用いることを提案しており、客観的に試合の優勢・劣勢を表現可能であることを提案している。また同様に Kim⁶⁾ は、サッカーゲーム⁷⁾ の Voronoi 解析を行い、Voronoi 図が試合の優勢・劣勢を表現可能であることを示している。

筆者も Voronoi 図を用いたサッカーの試合分析ソフトウェアを開発し、⁸⁾ RoboCup Soccer Simulation (RCSS) 2D リーグのログデータを基にチームやボール保持者の占有面積と得点差との関係について分析している。⁹⁾ Voronoi 図の面積を基にチームとボール保持者の占有面積を求め、更にそれに重み付けしたものを求め、得点差との関係を分析した。その結果、重み付けした方が、重み付けしない場合に比べて試合結果を良く反映していた。これは、ボールポゼッション率が高くてゴール近くまで攻め込むことが出来なければ、得点に繋がらないことを意味している。また、チームとボール保持者の占有面積を比較すると、ボール保持者の占有面積の方が試合結果を良く反映していた。これは、ボールを持っている選手がより広いスペースを確保して優位な状態でプレイできる方が得点に繋がり易いことを意味している。

Delaunay 図による分析も、過去に複数の研究報告がされており、例えば、成塚と山崎¹⁰⁾

1) 静岡産業大学経営学部
〒438-0043 静岡県磐田市大原1572-1

1) School of Management, Shizuoka Sangyo University
1572-1 Owara, Iwata, Shizuoka, 438-0043, Japan.

は、Delaunay 図によって得られるネットワークの隣接行列を用いて、フォーメーションを定量的に定義し、フォーメーションの時間変化の解析手法を提案している。筆者も Delaunay 図を用いて得点差と選手間ネットワークの次数の関係について研究を行っている。¹¹⁾ 分析では、先ず両チーム合わせた選手全員の Delaunay 図を求め、その中で味方の選手同士のネットワークの次数を求めた。そして、更に重み付けしたものを求め、得点差との関係を分析した。その結果、占有面積同様、重み付けをした方が、重み付けをしない場合に比べて試合結果を良く反映していた。これは、いくら選手間ネットワークの次数が高くてもゴール近くまで攻め込むことが出来なければ、得点に繋がらないことを表している。また、チームの指標とボール保持者の指標を比較すると、こちらも占有面積同様、ボール保持者の指標の方が試合結果を良く反映していた。これは、ボールを持っている選手がより高い次数を確保して優位な状態でプレイできる方が得点に繋がりがやすいことを意味している。

これまで筆者が開発した占有面積を用いた指標、⁹⁾ 選手間ネットワークの次数を用いた指標¹¹⁾は、共に重み付けをした方が、重み付けをしない方に比べて試合結果を良く反映していた。また、チームの指標よりもボール保持者の指標の方が試合結果を良く反映していた。このことから、両者を掛け合わせた混合型指標を開発すれば、更に試合結果を良く表す指標を手に入れることができると予想される。また、このような混合型指標の開発はこれまでに皆無である。そこで本研究では、2007 RCSS 2D リーグ Main Round のログデータを基に、得点差と混合型指標の関係について分析を行い、その結果について考察する。

II. 研究方法

本研究では、RCSS 2D リーグのログデータについて Voronoi 解析および Delaunay ネットワーク解析を行い、本研究で開発した混合型指標と試合の得点差の関係について分析する。

1. 分析データ

本研究では、2007 RCSS 2D リーグ Main Round¹²⁾の49試合の内、片方のチームが一方的に攻め続けているにも関わらず、なかなか得点できない4試合を外れ値として除外し、残りの45試合について分析をおこなう。また、試合中のプレイモードでは「play_on」(通常の試合進行時)の状態のみ分析を行った。更にボール保持者の判定については、ボールが選手から半径1m以内にあるかどうかで判定をおこなう。

2. Voronoi 図と Delaunay 図

Voronoi 図は、地理情報処理の分野で施設の利用圏を求める際にしばしば用いられる図形である。本研究では、母点となる施設をサッカー選手に置き換えて、各選手の占有地を Voronoi 図によって表し、各選手や各チームの占有面積を分析する。施設をサッカー選手に置き換える場合、2チームの選手が混在することになるが、これを区別せずに施設の場合と同様、Voronoi 図を求めることにする。

Delaunay 図は、Voronoi 図と双対な関係にある図形であり、最近接選手間ネットワークである。ただし、一般の Delaunay 図と異なるのは、2チームの選手が混在していることである。成塚と山崎¹⁰⁾は、チーム毎に Delaunay 図を求めて分析を行っているのに対し、本研究では、先ず両チームの選手を区別せずに Delaunay 図を求め、その後で異なるチームの選手同士の繋がりを削除している。その為、成塚と山崎の研究とは選手間ネットワークの定義が異なっている。

計算精度については、各 Voronoi 多角形の面積の合計とコート全体の面積を比較するサムチェックによって、その誤差が常に $10^{-11}\%$ 以下となるように精度保証されている。

3. 混合型指標の定式化

ここでは、占有面積および選手間ネットワークの次数から成る新たな混合型指標を定式化する。

(1) 各選手に関する指標

最初に各選手に関する指標を定式化する。選手 i の占有面積 s_i 、次数 k_i 、そして占有面積 s_i と次数 k_i の混合型指標 f_i を次のように定義する。

$s_i \equiv$ (選手 i を母点とする Voronoi 多角形の面積) (1)

$k_i \equiv$ (Delaunay ネットワーク解析で得られる選手 i と同じチームの選手との繋がり数) (2)

$f_i \equiv s_i k_i$ (3)

占有面積 s_i の値が大きい程、より優れた状態でパスの受け渡しが可能であり、また次数 k_i の値が大きい程、パスの選択肢が多い。

(2) チームに関する指標

次に、チームに関する指標を定式化する。チームの占有面積 S 、次数 K 、占有面積 S と次数 K の混合型指標 F をそれぞれ次のように定義する。

$S \equiv \sum_i s_i$ (4)

$K \equiv \sum_i k_i$ (5)

$F \equiv \sum_i f_i$ (6)

占有面積 S の値が大きい程、そのチームが優勢であると考えられる。また次数 K が大きい程、そのチーム内でのパスの選択肢が多いと考えられる。

(3) 重み付けされた指標

前述 (1) の各選手に関する指標では、コート内での選手の位置に関わらず占有面積や次数の大きさだけを扱っているが、実際には相手ゴールに近い位置と遠い位置では、その重みが異なると考えられる。そこで次のような、相手ゴールの中心を原点とし、味方ゴールの中心が上側 5% 点となる正規分布関数 $g(x, y)$ を各選手の占有面積に掛けて重み付けをおこなう。

$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$, (7)
ただし、 $\sigma=105/1.64$ である。

そこで、重み付けされた選手 i の占有面積 \bar{s}_i 、次数 \bar{k}_i 、混合型指標 \bar{f}_i をそれぞれ次のように定義する。

$\bar{s}_i \equiv s_i g(x_i, y_i)$ (8)

$\bar{k}_i \equiv k_i g(x_i, y_i)$ (9)

$\bar{f}_i \equiv f_i g(x_i, y_i)$ (10)

また、重み付けされたチームの占有面積 \bar{S} 、次数 \bar{K} 、混合型指標 \bar{F} をそれぞれ次のように定義する。

$\bar{S} \equiv \sum_i \bar{s}_i$ (11)

$\bar{K} \equiv \sum_i \bar{k}_i$ (12)

$\bar{F} \equiv \sum_i \bar{f}_i$ (13)

(4) 全試合時間を通しての指標

前述 (1) から (3) までの指標は、試合中のあるスナップショットに対するものである。本研究では、得点差との関係を調べる為、全試合時間を通しての指標を定義しておく。ただし、ここで言う「全試合時間」というのは、試合のステータスが「Play_on」の時の合計時間 T を指す。

選手 i の全試合時間を通しての占有面積の平均を「平均占有面積 u_i 」、次数の平均を「平均次数 v_i 」、占有面積 \times 次数の平均を「占有面積 \times 次数の平均 w_i 」と呼び、次のように定義する。

$u_i \equiv \frac{1}{T} \int s_i(t) dt$ (14)

$v_i \equiv \frac{1}{T} \int k_i(t) dt$ (15)

$w_i \equiv \frac{1}{T} \int f_i(t) dt$ (16)

ここで、平均としたのは、「Play_on」の合計時間 T が試合毎に異なる為である。その為、平均することによって、他の試合の指標とも比較可能となる。

次に、チームに関する全試合時間を通しての平均占有面積 U 、平均次数 V 、占有面積 \times 次数の平均 W を次のように定義する。

$U \equiv \frac{1}{T} \int S(t) dt$ (17)

$V \equiv \frac{1}{T} \int K(t) dt$ (18)

$W \equiv \frac{1}{T} \int F(t) dt$ (19)

同様に、重み付けされた選手 i の全試合時間を通しての平均占有面積 \bar{u}_i 、平均次数 \bar{v}_i 、占有面積 \times 次数の平均 \bar{w}_i を次のように定義する。

$\bar{u}_i \equiv \frac{1}{T} \int \bar{s}_i(t) dt$ (20)

$\bar{v}_i \equiv \frac{1}{T} \int \bar{k}_i(t) dt$ (21)

$\bar{w}_i \equiv \frac{1}{T} \int \bar{f}_i(t) dt$ (22)

また、重み付けされたチームの全試合時間

を通しての平均占有面積 \bar{U} 、平均次数 \bar{v} 、占有面積×次数の平均 \bar{W} を次のように定義する。

$$\bar{U} \equiv \frac{1}{T} \int \bar{S}(t) dt \quad (23)$$

$$\bar{v} \equiv \frac{1}{T} \int \bar{K}(t) dt \quad (24)$$

$$\bar{W} \equiv \frac{1}{T} \int \bar{F}(t) dt \quad (25)$$

(5) ボール保持者に関する全試合時間を通しての指標

各選手の指標を求めて分析を行うことは、実際のサッカーでは重要であるが、今回分析を行った RCSS 2D の場合、フォーメーションが実際のサッカーと異なり曖昧である為、本研究では選手毎の指標分析を行わないことにする。しかしその代わり、ボール保持者に関する全試合時間を通しての指標を定義し、分析を試みる。

チーム毎のボール保持者の平均占有面積 u^{BH} 、平均次数 v^{BH} 、占有面積×次数の平均 w^{BH} をそれぞれ次のように定義する。

$$u^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int s_m(t) dt \quad (26)$$

$$v^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int k_m(t) dt \quad (27)$$

$$w^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int f_m(t) dt \quad (28)$$

ただし、 Σ はボールを保持していたチームの選手 m についての和である。また積分は、選手 m がボールを保持していた時間について行うものとする。

同様に、重み付けされたチーム毎のボール保持者の平均占有面積 \bar{u}^{BH} 、平均次数、占有面積×次数の平均 \bar{W} をそれぞれ次のように定義する。

$$\bar{u}^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int \bar{s}_m(t) dt \quad (29)$$

$$\bar{v}^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int \bar{k}_m(t) dt \quad (30)$$

$$\bar{w}^{BH} \equiv \frac{1}{T} \sum_m \int \bar{f}_m(t) dt \quad (31)$$

4. 得点差との関係を調べる為の指標

これまでに定式化した指標と得点差との関係を調べる為、次のような指標を導入する。ただし、得点の多かったチームを A、少なかったチームを B とする。

(1) 平均占有面積比

$$\cdot \text{チームに関する比率: } U_A/U_B \quad (32)$$

$$\cdot \text{ボール保持者に関する比率: } u_A^{BH}/u_B^{BH} \quad (33)$$

・重み付けされたチームに関する比率:

$$\bar{U}_A/\bar{U}_B \quad (34)$$

・重み付けされたボール保持者に関する比率:

$$\bar{u}_A^{BH}/\bar{u}_B^{BH} \quad (35)$$

(2) 平均次数比

$$\cdot \text{チームに関する比率: } V_A/V_B \quad (36)$$

$$\cdot \text{ボール保持者に関する比率: } v_A^{BH}/v_B^{BH} \quad (37)$$

・重み付けされたチームに関する比率:

$$\bar{V}_A/\bar{V}_B \quad (38)$$

・重み付けされたボール保持者に関する比率:

$$\bar{v}_A^{BH}/\bar{v}_B^{BH} \quad (39)$$

(3) 占有面積×次数の平均比

$$\cdot \text{チームに関する比率: } W_A/W_B \quad (40)$$

$$\cdot \text{ボール保持者に関する比率: } w_A^{BH}/w_B^{BH} \quad (41)$$

・重み付けされたチームに関する比率:

$$\bar{W}_A/\bar{W}_B \quad (42)$$

・重み付けされたボール保持者に関する比率:

$$\bar{w}_A^{BH}/\bar{w}_B^{BH} \quad (43)$$

筆者は既に、(1) の平均占有面積比と得点差の関係を文献 9 に於いて、また (2) の平均次数比と得点差の関係を文献 11 に於いて報告している。そこで本研究では、混合型指標である (3) の占有面積×次数の平均比と得点差の関係についての分析を行う。

III. 結果と考察

2007 RCSS 2D リーグ Main Round の 49 試合の内、外れ値である 4 試合を除いた 45 試合について Voronoi 解析および Delaunay ネットワーク解析を行い、前節 II -4(3) で定義した指標と得点差との相関分析を行った。

図 1 から図 4 に得点差とそれぞれの指標との相関関係を示す。横軸の得点差を見ると、実際のサッカーの試合と異なり、1 試合で 30 点以上の得点差となる試合もある。しかし、実際のリーグ戦全試合を通しての得失点差を考えると、その差が大きく開く場合もあるので、本研究では得点差はチームの強弱を表す 1 つの指標であると捉えることにする。また、図のキャプションには括弧書きで相関係数と t 検定を行った場合の p 値を示し、図中には

回帰直線と決定係数を示した。t 検定の結果は、全ての相関関係について p 値 < 0.05 であり有意であった。

図 1 に得点差とチームの占有面積×次数の平均比の相関関係を示す。縦軸の平均比は、0.4 倍から 2.6 倍の範囲に収まっており、この値が 1 を下回ったのは 18 試合である。比率では 1 が基準である為、指標の値と勝敗の逆転が非常に多いことが分かる。また相関係数は 0.58776 であり、やや強い正の相関がある。

図 2 に得点差とボール保持者の占有面積×次数の平均比の相関関係を示す。縦軸の平均比は、0.1 倍から 6 倍の範囲に収まっており、図 1 に比べると、その差が大きく広がって明瞭になっている。この値が 1 を下回ったのは 11 試合であり、図 1 よりも指標の値と勝敗の逆転が比較的少ないことが分かる。また相関係数は 0.75162 であり、強い正の相関がある。

図 3 には、得点差と重み付けされたチームの占有面積×次数の平均比の相関関係を示す。縦軸の平均比は、0.2 倍から 8.6 倍の範囲に収まっており、図 2 に比べると更にその差が広がっている。また、この値が 1 を下回ったのは 8 試合であり、指標の値と勝敗の逆転が最も少ない。また相関係数は 0.68608 であり、やや強い正の相関がある。

図 4 には、得点差と重み付けされたボール保持者の占有面積×次数の平均比の相関関係を示す。縦軸の重み付けされたボール保持者の平均次数比は、0.03 倍から 24 倍の範囲に収まっており、4 つの指標の中では最も範囲が広がっている。また、この値が 1 を下回った試合数は 9 であり、指標の値と勝敗の逆転が少なく、相関係数は 0.76832 であり、強い正の相関がある。したがって、この指標は総合的に試合結果を非常によく反映していると言える。

以上の結果から、重み付けをした指標の方が、重み付けをしない指標に比べて、総合的に試合結果を良く反映していると言える。これは、いくら指標の値が大きくてもゴール近くまで攻め込むことが出来なければ、得点に繋がらないことを良く表している。また、チームの指標とボール保持者の指標を比較す

ると、ボール保持者の指標の方が総合的に試合結果を良く反映していると言える。これは、ボールを持っている選手が、より広いスペースと高い次数を確保して優位な状態でプレイできる方が得点に繋がりがやすいことを表している。最後に、これまで筆者が開発した占有面積を用いた指標、⁹⁾ 及び選手間ネットワークの次数を用いた指標¹¹⁾と比較すると、本研究で開発した混合型指標が、総合的に最も良く試合結果を反映していた。

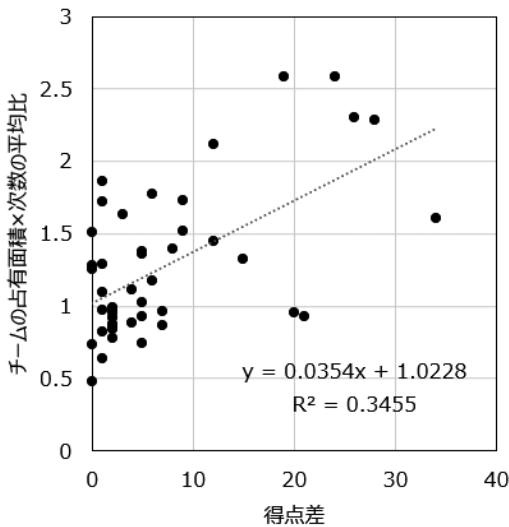


図1. 得点差とチームの占有面積×次数の平均比の関係 (相関係数: 0.58776, p 値 $= 2.19 \times 10^{-5}$)

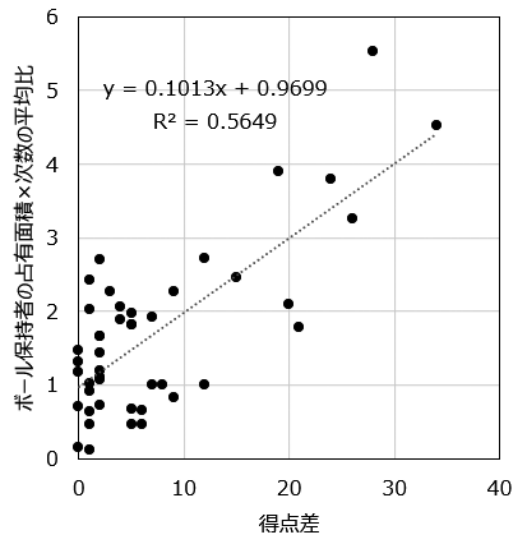


図2. 得点差とボール保持者の占有面積×次数の平均比の関係 (相関係数: 0.75162, p 値 $= 2.68 \times 10^{-9}$)

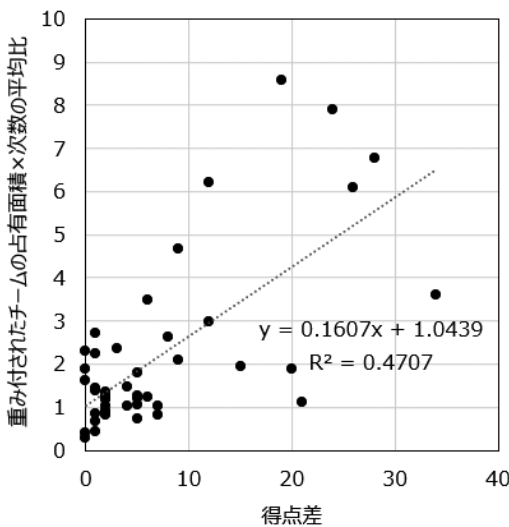


図3. 得点差と重み付けされたチームの占有面積×次数の平均比の関係 (相関係数: 0.68608, p 値 $= 1.98 \times 10^{-7}$)

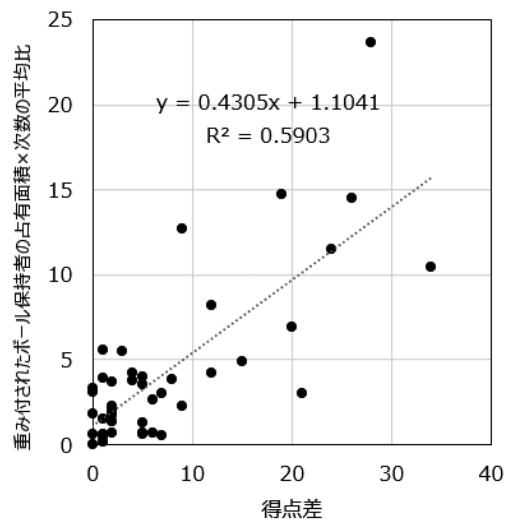


図4. 得点差と重み付けされたボール保持者の占有面積×次数の平均比の関係 (相関係数: 0.76832, p 値 $= 7.21 \times 10^{-10}$)

IV. 結語

本研究では、Voronoi 解析及び Delaunay ネットワーク解析の結果から得られる新たな混合型指標を開発し、その指標と試合の得点差の関係について、2007 RCSS 2D リーグ Main Round のログデータを基に分析を行った。

各選手の占有面積と次数を求め、それを掛け合わせた混合型指標を開発し、更にはそれらを重み付けしたものとそうではないものに分けて分析を行った。その結果、重み付けをした指標の方が、重み付けをしない指標に比べて、総合的に試合結果を良く反映していた。これは、いくら占有面積や次数が高くてゴール近くまで攻め込むことが出来なければ、得点に繋がらないことを良く表している。また、チームの指標とボール保持者の指標を比較すると、ボール保持者の指標の方が総合的に試合結果を良く反映していた。これは、ボールを持っている選手が、より広いスペースと高い次数を確保して優位な状態でプレイできる方が得点に繋がりやすいことを表している。最後に、これまで筆者が開発した占有面積を用いた指標、選手間ネットワークの次数を用いた指標と比較すると、本研究で開発した混合型指標が、総合的には最も良く試合結果を反映していた。

今後の研究としては、今回開発した指標は攻撃に関する指標であったのに対し、今後は守備に関する指標の開発にも取り組みたい。また、試合の得点差が大きいバスケットボールのようなチームスポーツ競技の分析にも取り組みたい。

参考文献

- 1) 加藤健太, 「サッカーに於けるデータ解析とチーム強化」, 『通信ソサエティマガジン』 No.37, 夏号, 電子情報通信学会, 2016, pp.29-34.
- 2) デイヴィッド・サンプター, 『サッカーマティクス 数学が解明する強豪チーム「勝利の方程式」』, 光文社, 2017.
- 3) G. Voronoi, "Nouvelles applications des para-mètres continus à la théorie des formes quadratiques" J. Reine Angew. Math. Vol.134, 1908, pp.198 ~ 287.
- 4) B. Delaunay, "Sur la sphère vide". Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. 6, 1934, pp.793 ~ 800.
- 5) 瀧剛志, 長谷川純一, 「勢力範囲に基づいたチームスポーツ解析」, 『情報処理』, 42 巻, 6 号, 2001, pp.582 ~ 586.
- 6) S. Kim, 'Voronoi Analysis of a Soccer Game', Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vol.9, No.3, 2004, pp.233 ~ 240.
- 7) エレクトロニック・アーツ, 「FIFA 2003 ヨーロッパサッカー」, 2002.
- 8) 青木優, 「計算幾何学によるサッカーの試合分析ソフトウェアの開発」, 『環境と経営』, 第 25 巻, 第 1 号, 2019, pp.31 ~ 41.
- 9) 青木優, 「サッカーの試合に於ける占有面積と得点差の関係」, 『スポーツと人間』, 第 4 巻, 第 1 号, 2020, pp.1 ~ 7.
- 10) 成塚拓真, 山崎義弘, 「統計物理の眼で見るサッカー」, 『日本物理学会誌』, Vol.72, No.10, 2017, pp.747 ~ 751; 成塚拓真, 山崎義弘, 「ドロネー分割と階層的クラスタリングを用いた集団スポーツにおけるフォーメーション解析手法の提案」, 『統計数理』, 第 65 巻, 第 2 号, 2017, pp.299 ~ 307.
- 11) 青木優, 「サッカーの試合に於ける選手間ネットワークの次数と得点差の関係」, 『スポーツと人間』, 第 4 巻, 第 1 号, 2020, pp.8 ~ 14.
- 12) RoboCupSoccer Simulation 2D ログデータ, <http://archive.RoboCup.info/Soccer/Simulation/2D/> (accessed Mar. 1, 2019).

