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

青木　優[1)]

Relationship between Degree of Players Network and Score Difference in Football Match

AOKI Masaru

Abstract

The purpose of this study is to clarify the relationship between the degree of players network and the score difference in football match. We developed the indices of the degree based on Delaunay network 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： Delaunay network, RoboCup Soccer

Ⅰ．緒言

近年、スポーツデータ解析の分野では、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取得可能となり、目覚ましい発展がある。[1)] スポーツデータ解析によって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戦術分析を行う際、フォーメーションの分析は重要である。[2)] この分析手法として注目されているのが、計算幾何学の分野で用いられている Voronoi 図[3)]と Delaunay 図[4)]による解析である。

Voronoi 図は、しばしば地理情報処理[5)]の分野で施設の利用圏を求める際に用いられており、適当な目的関数を設定することによって最適施設配置問題を解くことにも利用できる。[6)] この施設をサッカー選手に置き換えると各施設の利用圏は各選手の占有地となり、その面積が広い程、味方とのパスの受け渡しが高い確率で可能なであると考えられる。また、この面積をチームで合計すると、試合の優勢・劣勢を客観的に数値化することが可能である。これについては、既に複数の研究報告がされており、例えば、瀧と長谷川[7)]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（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主張している。また同様に Kim[8)] は、サッカーゲーム[9)]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、[10)] RoboCup Soccer Simulation (RCSS) 2D リーグ[11)]のログデータを基に占有面積と得点差の関係について分析している。[12)] チームとボール保持者の占有面積、およびそれらを重み付けしたものとしないものを求めて得点差との相関関係を分析した。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もゴール近くまで攻め込むことが出来なけ

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.

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 図は Voronoi 図と双対な関係にある図形であり、数値解析の為のメッシュ生成（三角形分割）[13] や巡回セールスマン問題の解法 [14] 等にも利用されている。Voronoi 図が各選手の占有地を表している一方で、Delaunay図はパスが通る可能性の高い最近接選手間ネットワークを表している。Delaunay 図を用いた研究も Voronoi 図を用いた研究同様、複数のグループが発表している。例えば、成塚と山崎 [15] 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。そこで本研究では、RCSS 2D リーグのログデータを基に、得点差と Delaunay 図による選手間ネットワークの次数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 Delaunay ネットワーク解析を行い、選手間ネットワークの次数と試合の得点差の関係について分析を行う。

1．分析データ

RCSS 2D リーグでは、実際のサッカー場と同サイズ（105m × 68m）のサッカー場を想定し、選手もボールも 2 次元平面内を動く。ただし、ゴール幅は実際の幅よりも広くなっている。試合時間は前後半各 3000 サイクルで、合計 6000 サイクルである。ただし、1 サイクルは 0.1 秒に相当する。また、各選手はそれぞれ独立した人工知能を搭載したエージェントであり、1 チーム当たり 11 体で試合を行う。選手の視野は人間並みに狭く、ボールや他の選手との距離などを正確に把握できず、ボールを蹴っても正確に飛ばない。また、選手間の情報のやり取りも十分でなく、人間に近いエージェントを想定している。毎年開催されている国際大会のログファイルは、試合終了後にはインターネット上に公開することになっている。[16] そこで本研究では、2007 RCSS 2D リーグ Main Round 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は 30 種類程ある中で、ボールが動いている「play_on」（通常の試合進行時）の状態のみの分析を行う。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．Delaunay 図

ロシア人数学者 B. Delaunay によって提唱された Delaunay 図は、Voronoi 図と双対な関係にある図形である。図 1 の郵便ポストの Voronoi 図（破線）に於いて、隣接する Voronoi 多角形の母点となる郵便ポスト同士を線分で結んでできる図形が Delaunay 図（実線）である。

次に郵便ポストをサッカー選手に置き換えて、Delaunay 図を描くと図 2 のようになる。郵便ポストの場合と異なるのは、2 チームの選手が混在していることである。成塚と山崎 [15] の研究では、同じチームの選手のみで 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（灰色）を削除しており、成塚らの Delaunay 図とは定義が異なる。また本研究では、選手間ネットワークの次数は、同じチームの選手との繋がりの数と定義する。

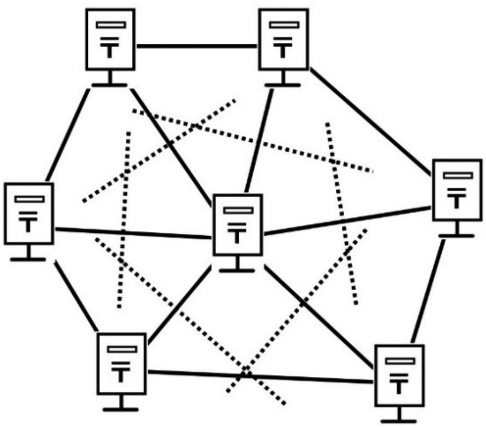

図１．郵便ポストの Voronoi 図（破線）と Delaunay 図（実線）

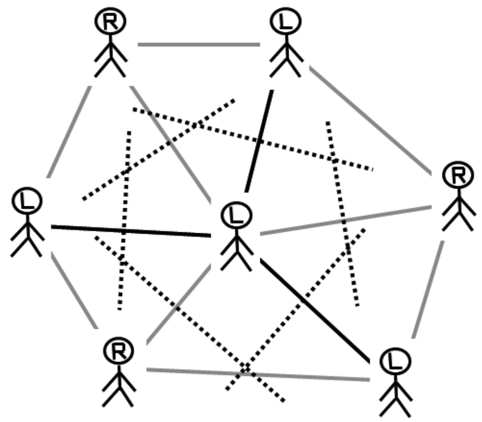

図２．サッカー選手の Voronoi 図（破線）と Delaunay 図（実線）

3. 選手間ネットワークに関する指標の定式化

ここでは、選手間ネットワークの次数を基にした新たな指標を定式化する。

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の次数 k_iを次のように定義する。

$k_i \equiv$（Delaunay ネットワーク解析によって得られる選手ｉと同じチームの選手との繋がりの数）　(1)

この次数 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。チームの次数 K を次のように定義する。

$$K \equiv \sum_i k_i \tag{2}$$

この次数Ｋの値が大きい程、そのチーム内でのパスが通りやすいと考えられる。

３）重み付けされた指標

前述（１）の各選手の指標では、コート内での選手の位置に関わらず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 $g(x,y)$を各選手の次数に掛けて重み付けをおこなう。

$$g(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \tag{3}$$

ただし、σ=105/1.64 である。

そこで、重み付けされた選手ｉの次数を

$$\bar{k}_i \equiv k_i g(x_i, y_i) \tag{4}$$

と定義し、重み付けされたチームの次数を

$$\bar{K} \equiv \sum_i \bar{k}_i \tag{5}$$

と定義する。

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。本研究ではこれら指標と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、ここでい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次数の平均を「平均次数 v_i」と呼び、

$$v_i \equiv \frac{1}{T}\int k_i(t)dt \tag{6}$$

と定義する。また、チームの平均次数 V を

$$V \equiv \frac{1}{T}\int K(t)dt \tag{7}$$

と定義する。同様に、重み付けされた選手ｉの平均次数 $\bar{v}_i$ を

$$\bar{v}_i \equiv \frac{1}{T}\int \bar{k}_i(t)dt \tag{8}$$

と定義し、重み付けされたチームの平均次数を $\bar{V}$

$$\bar{V} \equiv \frac{1}{T}\int \bar{K}(t)dt \tag{9}$$

と定義する。ここで、平均としたのは、「Play_

on」の合計時間が試合毎に異なる為である。平均することによって、他の試合の指標も比較可能となる。

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の場合、チームの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次数 v^{BH} を

$$v^{BH} \equiv \frac{1}{T}\sum_m \int k_m(t)dt \tag{10}$$

と定義する。ただし、Σはボールを保持していたチームの選手 m についての和であり、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次数 $\bar{v}^{BH}$ を

$$\bar{v}^{BH} \equiv \frac{1}{T}\sum_m \int \bar{k}_m(t)dt \tag{11}$$

と定義する。

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。

- チームの平均次数比：V_A/V_B (12)
- ボール保持者の平均次数比：v_A^{BH}/v_B^{BH} (13)
- 重み付けされたチームの平均次数比：$\bar{V}_A/\bar{V}_B$ (14)
- 重み付けされたボール保持者の平均次数比：$\bar{v}_A^{BH}/\bar{v}_B^{BH}$ (15)

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Delaunayネットワーク解析を行い、前節Ⅱ-4で定義した指標と得点差との相関分析を行った。

図３に試合中の各選手を母点としたVoronoi図（破線）とDelaunay図（実線）を示す。黒丸は左側チームの選手を表し、灰色の丸は右側チームの選手である。またボールは白丸で示されており、図中では左側チームの選手がボールを保持している。Voronoi図とDelaunay図は共に両チーム22人全員に対して求めているが、Delaunay図に関しては味方の選手だけと実線で繋いでいる。また次数に関しても、味方の選手との繋がりの数と定義している。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。

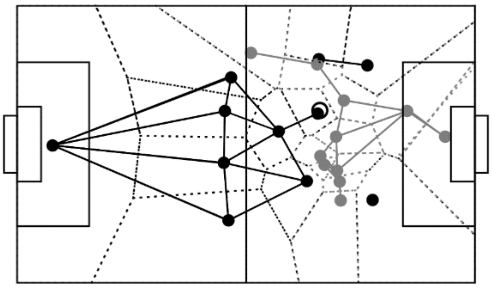

図３．試合中の選手のVoronoi図（破線）とDelaunay図（実線）

次に図４から図７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。図４の得点差とチームの平均次数比の相関関係についてはp値 =0.301(>0.05)となり有意ではなかったが、それ以外の相関関係についてはp値 <0.05 で有意であった。

図５に得点差とボール保持者の平均次数比の相関関係を示す。縦軸のボール保持者の平均次数比は、0.1倍から4倍の範囲に収まっ

ている。4倍というのは、1人のボール保持者に対して繋がっている味方の平均人数が4倍ということなので、非常に大きな値と言える。相関係数は、0.67578であり、やや強い正の相関がある。

図6に得点差と重み付けされたチームの平均次数比の相関関係を示す。縦軸の重み付けされたチームの平均次数比は、0.4倍から4.6倍の範囲に収まっており、図5のボール保持者の平均次数比に近い値となっている。しかし、この値が1を下回ったのは僅か5試合であり、図5の13試合よりも少なく、指標の値と勝敗の逆転が非常に少ない。相関係数は0.69211であり、これもやや強い正の相関がある。

図7には、得点差と重み付けされたボール保持者の平均次数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14倍の範囲に収まっており、4つの指標の中では最も値の差が大きくなっている。また、この値が1を下回った試合数は6であり、指標の値と勝敗の逆転が少なく、相関係数は0.78599であり、強い正の相関がある。したがって、この指標は試合結果を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、いくらチームやボール保持者の平均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。

Ⅳ. 結語

本研究では、Delaunayネットワーク解析によって、得点差と選手間ネットワークの次数の関係について、RCSS 2D リーグのログデータを基に分析を行った。分析では、先ずチームとボール保持者の平均次数を求め、更に重み付けした平均次数も求めた。そして、それぞれの次数について両チームの比を求め、得点差との関係を分析した結果、重み付けをした方が、しない方に比べて試合結果を良く反映していた。これは､いくら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、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やすいことを意味している。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。

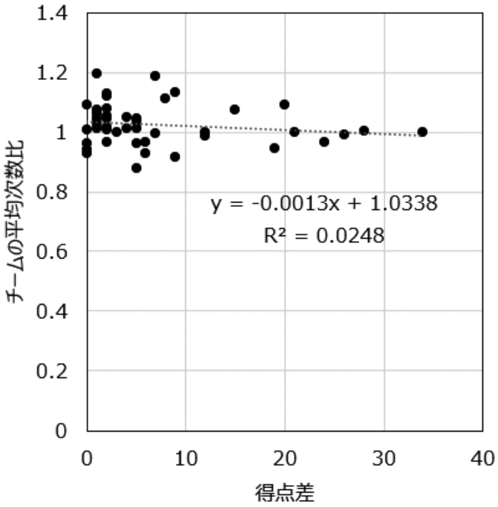

図４．得点差とチームの平均次数比の関係（相関係数：-0.15763, p 値 =0.301）

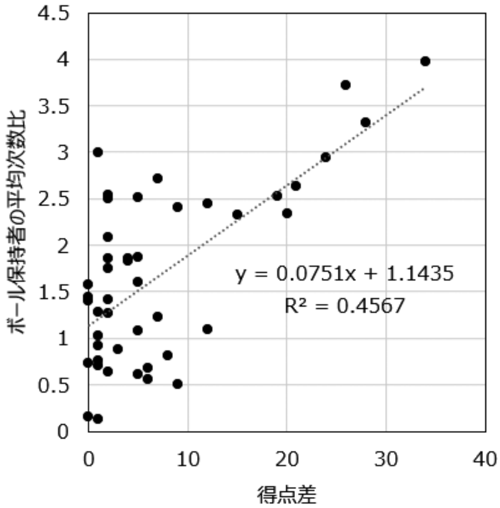

図５．得点差とボール保持者の平均次数比の関係（相関係数：0.67578, p 値 =3.514 × 10^{-7}）

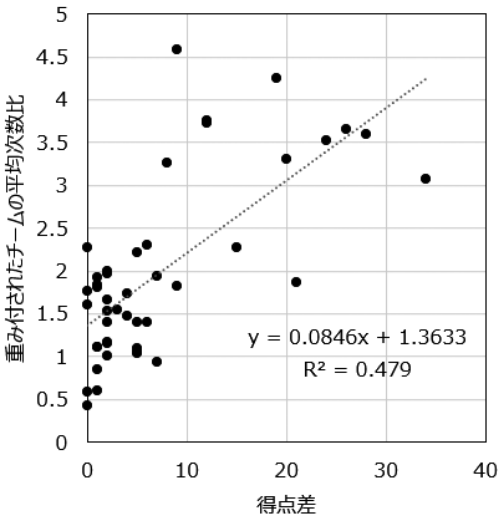

図６．得点差と重み付けされたチームの平均次数比の関係（相関係数：0.69211, p 値 =1.394 × 10^{-7}）

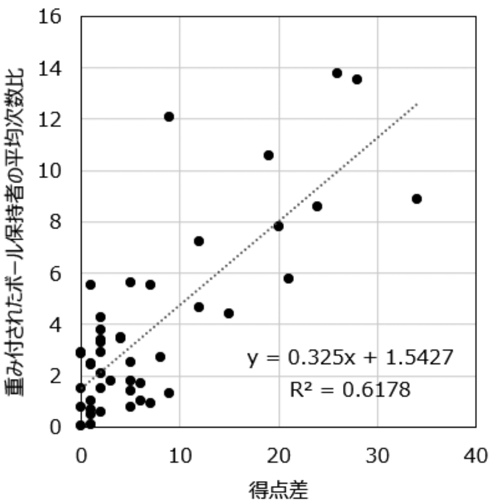

図７．得点差と重み付けされたボール保持者の平均次数比の関係（相関係数：0.78599, p 値 =2.19 × 10^{-5}）

参考文献

1) 加藤健太,「サッカーに於けるデータ分析とチーム強化」,『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 continues 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) 伊理正夫,『計算幾何学と地理情報処理』, 共立出版, 1997; 岡部篤行, 鈴木敦夫,『最適配置の数理』, 朝倉書店, 1992.
6) 青木優,「Tanner-Sherratt モデルにおける最適施設配置問題－計算機科学と物理学からのアプローチ－」, 青山学院大学経済学会『青山経済論集』, 第 52 巻, 第 2 号, 2000, pp.5 ~ 21; 青木優,「Newling モデルにおける最適施設配置問題」, 静岡産業大学論集『環境と経営』, 第 7 巻, 第 2 号,2001, pp.31 ~ 41; 青木優,「Tanner-Sherratt モデルにおける最適施設配置問題－最適配置の分類－」静岡産業大学論集『環境と経営』, 第 8 巻, 第 2 号, 2002, pp.81 ~ 88.
7) 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.
8) S. Kim, 'Voronoi Analysis of a Soccer Game', Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vol.9, No.3, 2004, pp.233 ~ 240.
9) エレクトロニック・アーツ,「FIFA 2003 ヨーロッパサッカー」, 2002.
10) 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.
11) RoboCup Federation, https:// www.robocup.org/ (accessed Mar. 1, 2019).
12) 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.
13) 田島 玲, 今井 浩「三角形分割の最適性と整数計画による定式化」,『情報処理学会論文誌』, 第 40 巻, 7 号, 1999, pp.2861 ~ 2871.
14) 玉木 久夫, 土屋 裕希,「平面ユークリッド TSP の分割統治法ヒューリスティックス」,『情報処理学会研究報告アルゴリズム (AL)』 Vol.2007, No.23, 2007, pp.121 ~ 128.
15) 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.
16) RoboCupSoccer Simulation 2D ログデータ, http://archive.RoboCup.info/Soccer/ Simulation/2D/ (accessed Mar. 1, 2019).