

研究ノート

サッカーの試合に於ける パス経路とドロネー・ネットワークの関係

Relationship between Delaunay Network and Passing Routes of Ball in Football Match

青木 優¹⁾
AOKI Masaru

(2021年4月27日受理)

Abstract

The purpose of this study is to clarify the relationship between Delaunay network and passing routes of ball in the football match, and further the relationship between the number of pass on the network and the outcome of the match. We defined the 'Delaunay-pass' as which is the pass on the Delaunay network and 'non-Delaunay-pass' as which is the pass on the non-Delaunay network, and analyzed the log data of RoboCup Soccer Simulation (RCSS) 2D league. As a result, although the percentage of Delaunay-pass is about 25% of all passes, it was found that the number of Delaunay-pass can well explain the outcome of the football match.

Keywords: Voronoi tessellation, Delaunay network, RoboCup Soccer Simulation 2D league

- I. 緒言
- II. 研究方法
- III. 結果と考察
- IV. 結語

I. 緒言

近年、サッカーをはじめとするチームスポーツ競技に於いては、IoTや映像解析技術の発展と共に様々なトラッキングデータが採取可能となっており、選手のコンディション管理や戦術分析に用いられている。¹⁾ チームスポーツの戦術分析を行う際、フォーメーション(選手の配置)の分析は重要であり、²⁾ 計算幾何学の分野で用いられるボロノイ図³⁾とドロネー図⁴⁾がしばしば用いられる。

ボロノイ図を用いた分析では、例えば、瀧

と長谷川⁵⁾による研究報告がある。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、全選手の走力を等しいと仮定した場合の到達可能時間に基づく優勢領域、つまりボロノイ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⁾のボロノイ解析を行い、ボロノイ図が試合の優勢・劣勢を表現可能であることを示している。筆者もボロノイ図を用いたサッカーの試合分析ソフト

¹⁾ 静岡産業大学スポーツ科学部
〒438-0043静岡県磐田市大原1572-1

¹⁾ Faculty of Sport Science, Shizuoka Sangyo University
1572-1 Owara, Iwata, Shizuoka, 438-0043, Japan.

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⁾先ずチームとボール保持者の占有面積を求め、更に相手ゴールからの距離に応じて占有面積に重み付けをし、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示している。

ドロネー図を用いた分析は、例えば、成塚と山崎¹⁰⁾による研究報告がある。各チームの選手のみでドロネー図を求め、そこから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することにより、フォーメーションの時間変化に関する解析手法を提案している。筆者もドロネー図を用いた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⁾最初に両チーム合わせた選手全員のドロネー図を求め、その中で味方の選手同士のネットワークの次数を求める。この方法は成塚等の方法と異なり、筆者のオリジナルである。そして、更に相手ゴールからの距離に応じて重み付けをし、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、単に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示している。また、チームとボール保持者の次数を比較すると、こちらも占有面積同様、ボール保持者の次数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。

このように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、それまでと同様のデータを基に、得点差とその混合型指標の関係について分析を行った。¹²⁾その結果、予想通りに混合型指標が、総合的に最も良く試合結果を反映していることが分かった。

このようにボロノイ図やドロネー図による試合分析は有効であるが、その一方で、試合の映像を見ていると、ドロネー図で繋がっていない味方選手にもパスが通ることがある。特に、ゴール直前のパス(ラストパス)は、そのようなパスとなっている。フォーメーションは相手ディフェンスを崩す目的もあるので、必ずしもパスだけが目的ではないが、実際のパス経路とドロネー・ネットワークの関係も、この分野の研究としては非常に重要である。しかし、それにも関わらず、そのような研究報告は皆無である。

そこで本研究では、これまでと同様、RCSS 2Dリーグのログデータを用いて、ドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係を分析し、更にはパス経路と試合結果の関係についても分析を行う。

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ドロネー・ネットワーク解析を行い、ドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係、及びパス経路と試合結果の関係について分析する。ここでは最初に分析するデータについて述べ、次にボロノイ図とドロネー図について説明し、最後に本研究で分析する「ドロネー・パス」と「非ドロネー・パス」、及び重み付けされたそれらのパスについて定式化する。

1. 分析データ

本研究では、2007 RCSS 2D リーグMain Round¹³⁾の全49試合について分析を行う。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以内にある場合にボール保持と判定する。

2. ボロノイ図とドロネー図

ボロノイ図は、しばしば地理情報処理の分野で施設の利用圏を求める際に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、各選手の占有地をボロノイ図によって表し、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、これを区別せずに各選手のボロノイ図(図1)を求める。ボロノイ分割の計算精度については、各ボロノイ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。

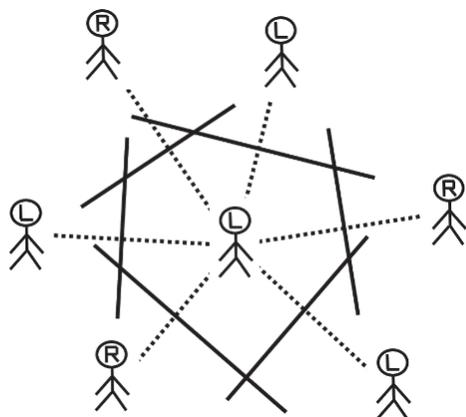


図1. サッカー選手のボロノイ図(実線)。

ドロネー図は、ボロノイ図と数学的には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を表す。ただし、一般のドロネー図と異なるのは、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

にドロネー図を求めてフォーメーションの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ドロネー図(図2)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、味方同士のネットワークを求めている。その為、成塚等の方法とは選手間ネットワークの定義が異なっており、筆者のオリジナルの定義となっている。その結果、他の研究報告には無い分析を行うことが可能である。

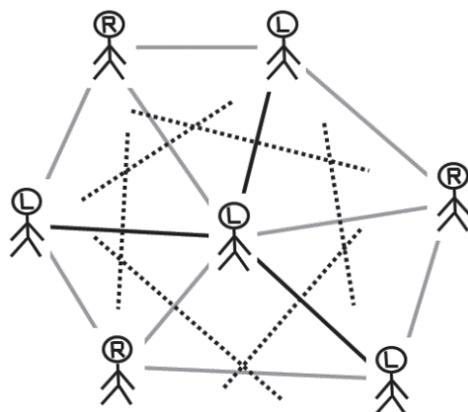


図2. サッカー選手のドロネー図。

本研究では、ドロネー図の内、灰色の実線は削除し、黒の実線のみを扱う。

3. 定式化

ドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係を分析するに当たり、ドロネー・ネットワークで繋がった味方に通すパスとドロネー・ネットワークで繋がっていない味方に通すパスに分けて、その数について分析する。以下にそれらのパス数と、それらを重み付けたパス数について定式化する。

(定義)

ドロネー・ネットワークで直接繋がっている味方の選手(最近接の味方の選手)へのパスを「ドロネー・パス」と呼ぶ。また、ドロネー・ネットワークで直接繋がっていない味方の選手(最近接ではない味方の選手)へのパスを「非ドロネー・パス」と呼ぶ。

これによって、各試合に於ける各チームのドロネー・パス数と非ドロネー・パス数を求めて比較することが可能となる。

次に、重み付けした各パス数を次のように定義する。

(定義)

重み付けしたドロネー・パス数と重み付けした非ドロネー・パス数は、次の重み関数を掛けてカウントすることによって得られる。

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 $g(x,y)$ を重み関数とし、パスの回数をカウントする際に、1ずつ増加するのではなく、パスを受けた選手の位置 (x,y) によって $1 \cdot g(x,y)$ だけ増加するようにする。

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

ただし、 $\sigma=105/1.64$ である。その為、重み付けしたパス数は非整数となる。

ここで説明した重み関数は、相手ゴール付近での味方の選手同士のパス数を抽出するフィルターの役割を果たす。

Ⅲ. 結果と考察

2007 RCSS 2DリーグMain Roundの全49試合についてドロネー解析を行い、全パス数、ドロネー・パス数、非ドロネー・パス数、及びそれらを重み付けした6つのパス数と得点との相関分析を行った。

1. 各パス数の平均値と勝敗との関係

表1に、各パス数の平均値と勝敗との関係を示す。表1の全体平均とは全チームの平均という意味である。全パス数に対するドロネー・パス数の割合を全体平均について求めると、 $36.29/146.5=0.248$ (24.8%)である。意外にもドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係は薄い。しかし、ドロネー・ネットワーク上で最近接の選手が相手の選手を引き付けて、空いたスペースにパスを出していることもありうるし、少ないなりにも重要な指標である可能性もあるので、必ずしもドロ

ネー・ネットワーク解析が役に立たないとは言えない。そこで、各パス数と勝ち・引き分け・負けの順で見た場合の相関関係について分析する。ただし、勝ちを2、引き分けを1、負けを0と勝ち点に数値化して相関分析を行う。

最初に、全パス数と勝ち点との相関係数は0.957、重み付きの場合は0.994であり、いずれも強い正の相関があるが、重み付きの場合の方が若干ではあるが強い相関がある。これは、強いチームほどコート全体でも相手ゴール付近でもパス数が多いが、相手ゴール付近の方がパスの増加が大であることを示している。また、全チームの各パス数の平均値は、おおよそ引き分けたチームの平均に近い値となっていることが分かる。

次に、ドロネー・パス数と勝ち点との相関係数は0.986、重み付きの場合は1.000であり、いずれも強い正の相関がある。これは、強いチームほどコート全体でも相手ゴール付近でもパス数が増加することを示している。ドロネー・ネットワーク上で最近接の味方選手には確実にパスが通るので、強いチームほどボールを持った選手の近くに確実にパスを受けることができる味方の選手が頻繁に居ると考えられる。

非ドロネー・パス数と勝ち点との相関係数は0.897、重み付きの場合は0.984であり、いずれも強い正の相関があるが、重み付きの場合の方が強い相関がある。

以上のことから、ドロネー・パス数は全パス数の内の25%程度しかないが、チームの勝敗と強い正の相関があり、非ドロネー・パス数も同様にチームの勝敗と強い正の相関があるが、ドロネー・パス程ではない。因みに、ラストパスについても調べたところ、全てのラストパスが非ドロネー・パスであった。ゴール付近では、相手のゴールキーパーやディフェンダーが多く居る為、これは当然の結果と考えられる。

2. 各パス数と得点の関係

前節の平均値よりも更に詳細な分析を行う為、図3から図6に全チームの得点と各パス数の散布図を示す。縦軸の得点を見ると、実際のサッカーの試合と異なり、1試合で30点以上の得点となる試合もある。しかし、実際のリーグ戦の全試合の合計得点を考えると、20点以上になることもあるので、得点はチームの強弱を表す1つの指標と考えることにし、実際のサッカーの試合の得点との差は議論しないことにする。また横軸については、重み付きパス数は重み付きではないパス数に比べて約1/100のスケールとなっている。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す。t検定の結果、図5の非ドロネー・パス数の場合を除いて、相関関係についてp値<0.05であり有意であった。

図3のドロネー・パス数の場合と図4の重み付きドロネー・パス数の場合がやや強い正の相関があり、図6の重み付き非ドロネー・パス数の場合は弱い正の相関が見られる。そして、図5の非ドロネー・パス数と得点の間には相関は認められない。つまり、非ドロネー・パス数よりもドロネー・パス数の方が、重み付きの有無に関わらず得点との相関が強いことがわかる。

3. 勝敗ごとの各パス数と得点の関係

ここでは、更に勝ちチーム・引き分けチーム・負けチームに分けて、前節同様、各パス数と得点の関係を分析する。

最初に、引き分けチームの得点は全て1点または無得点であり、負けチームは全て無得点である。したがって、この2つに関しては各パス数と得点の関係は無い。そこで、勝ちチームについてのみ分析を行うことにする。図7から図10に勝ちチームについての各パス数と得点の散布図を示す。図3から図6に於ける2得点以上のデータは勝ちチームのものであるので、グラフの様相も似ている。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す。t検定の結果、図7の重み

付けなしのドロネー・パス数のみが、相関関係についてp値<0.05であり有意であった。

前節で、非ドロネー・パス数よりもドロネー・パス数の方が、コート全体で見ても、ゴール付近のみで見ても得点との相関が強いことが分かった。この分析で分かることは、勝ったチームの中で大量に得点したチームの特徴は、コート全体でドロネー・パス数が多いということである。相手チームからボールを奪い、シュートに結びつけるまでに、より多くの確実に繋がるパス（ドロネー・パス）が含まれていることが、大量得点に繋がると考えられる。

4. 各パス数とポゼッション率の関係

ここまで、各パス数と得点の関係を見てきたが、今度は各パス数とポゼッション率の関係を分析する。

図11から図14に全チームについての各パス数とポゼッション率の散布図を示す。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す。t検定の結果、全てのパスについて、p値<0.05であり相関関係は有意であった。また何れもやや強い正の相関が見られたが、ドロネー・パス数と非ドロネー・パス数の両方で、重み付きパス数の方がポゼッション率との相関が強いことが分かる。これは、相手ゴール付近では相手ディフェンダーにボールを奪われやすいが、そこでパスが通りやすいことがポゼッション率を上げているものと思われる。

ポゼッション率は50%を境にボールを支配していた側とそうでない側に分かれるが、重み付きではない非ドロネー・パス数以外については、ポゼッション率50%以下のチームで各パス数が少なく、逆に50%以上では各パス数が比較的多いことが分かる。特に、重み付けをしたパス数の方が顕著である。

表1. 各パス数の平均と勝敗との関係

	全パス数	ドロネーパス数	非ドロネーパス数	重み付けされた 全パス数	重み付けされた ドロネーパス数	重み付けされた 非ドロネーパス数
全体平均 (標準偏差)	146.5 (49.45)	36.29 (29.16)	110.2 (36.15)	0.64 (0.37)	0.18 (0.23)	0.46 (0.42)
勝者平均 (標準偏差)	172.0 (48.67)	50.80 (29.59)	121.2 (37.22)	0.98 (0.42)	0.30 (0.26)	0.68 (0.45)
引分平均 (標準偏差)	135.1 (43.30)	32.60 (23.12)	102.5 (27.78)	0.58 (0.28)	0.18 (0.20)	0.40 (0.31)
敗者平均 (標準偏差)	123.6 (48.47)	22.61 (22.28)	101.0 (33.63)	0.32 (0.09)	0.06 (0.09)	0.26 (0.28)

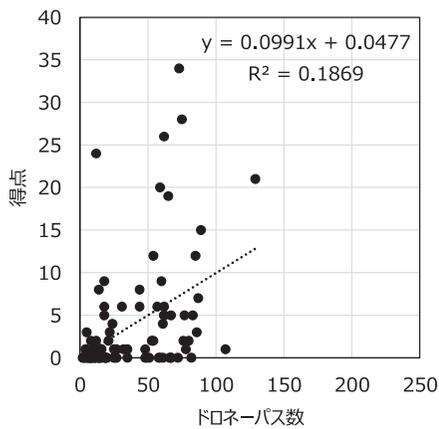


図3. 全チームのドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数: 0.4324, p値=8.76 × 10⁻⁶)

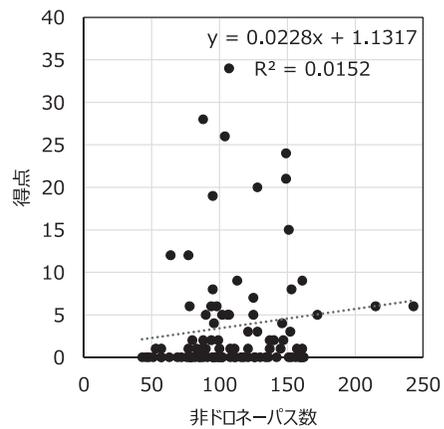


図5. 全チームの非ドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数: 0.1232, p値=0.2267)

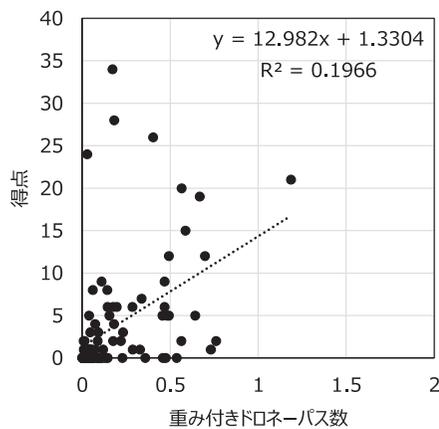


図4. 全チームの重み付きドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数: 0.4434, p値=4.83 × 10⁻⁶)

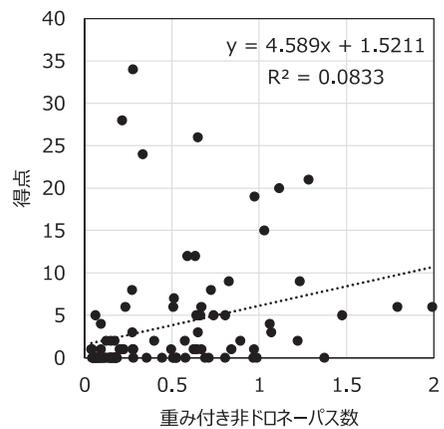


図6. 全チームの重み付き非ドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数: 0.2887, p値=3.94 × 10⁻³)

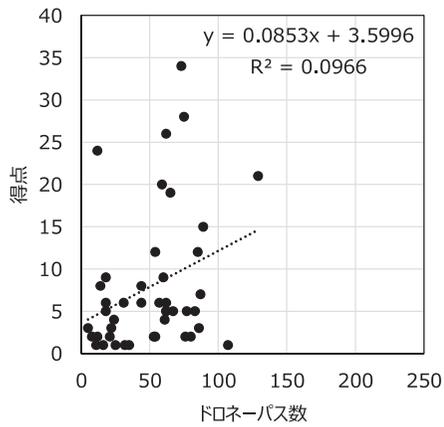


図7. 勝ったチームのドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数:0.3108, p値=0.03545)

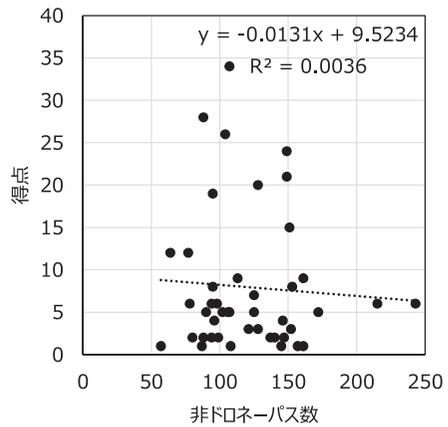


図9. 勝ったチームの非ドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数:-0.06020, p値=0.6911)

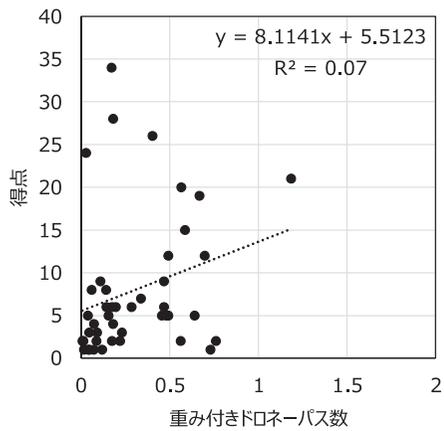


図8. 勝ったチームの重み付きドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数:0.2646, p値=0.07558)

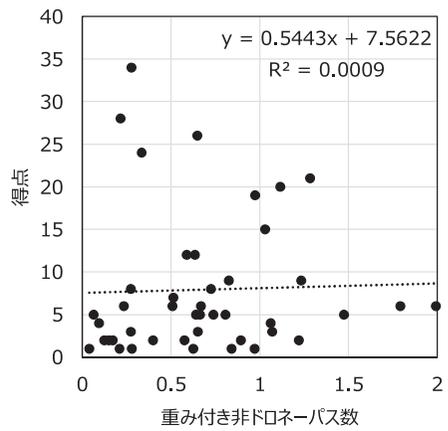


図10. 勝ったチームの重み付き非ドロネー・パス数と得点の関係
(相関係数:0.03033, p値=0.8414)

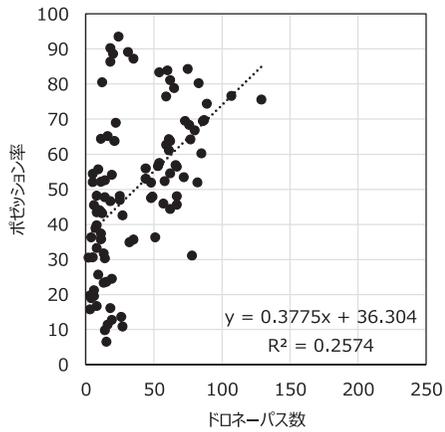


図11. 全チームのドローネーパス数とポゼッション率の関係
(相関係数:0.5074, p 値= 9.73×10^{-8})

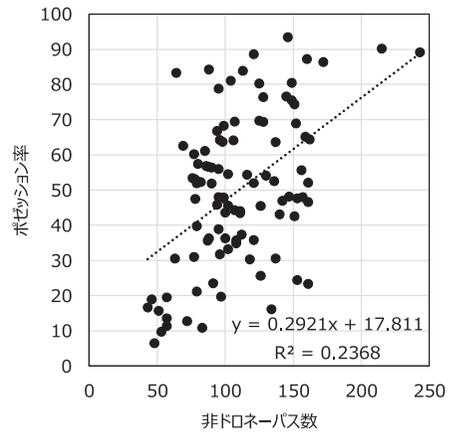


図13. 全チームの非ドローネーパス数とポゼッション率の関係
(相関係数:0.4866, p 値= 3.77×10^{-7})

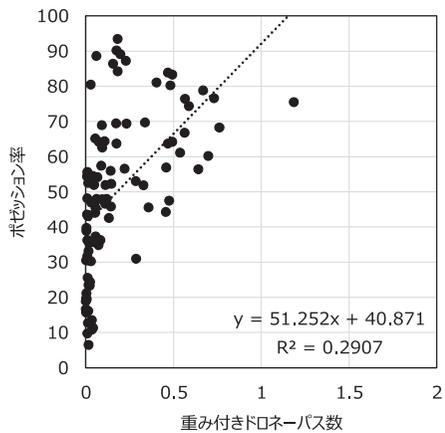


図12. 全チームの重み付きドローネーパス数とポゼッション率の関係
(相関係数:0.5391, p 値= 1.02×10^{-8})

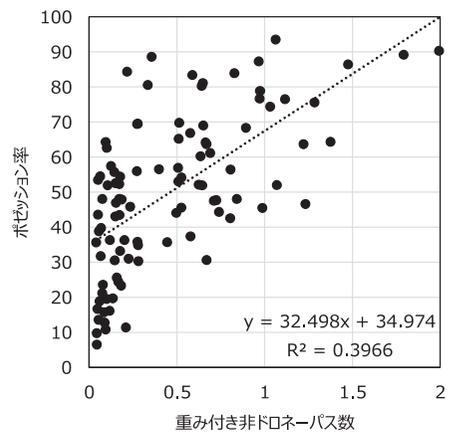


図14. 全チームの重み付き非ドローネーパス数とポゼッション率の関係
(相関係数:0.6297, p 値= 3.75×10^{-12})

IV. 結語

本研究では、ドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係を分析する為、ドロネー・ネットワークで繋がった相手に通すパス（ドロネー・パス）とそうでないパス（非ドロネー・パス）に分けて、その数について分析を行った。また、ゴール付近でのパス数も分析する為、カウントする際に重み関数を掛けることによりフィルターを掛けてパス数を求めた。分析したデータは、これまでの研究同様、2007 RCSS 2D リーグMain Roundのログデータである。

最初に、全パス数に対するドロネー・パス数の割合を求めたところ約25%であった。このことから、ドロネー・ネットワークと試合中のパス経路の関係は比較的薄いことがわかる。そこで次に、各パス数と勝敗の関係を調べたところ、ドロネー・パス数は全パス数の25%程度であるが、チームの強弱と強い正の相関があり、非ドロネー・パス数もドロネー・パス数程ではないが強い正の相関があった。次に、得点と各パス数の相関分析を行ったところ、非ドロネー・パス数よりもドロネー・パス数の方が、重み付きの有無に関わらず得点との相関が強いことが分かった。

更に、勝敗ごとに得点と各パス数の関係を分析した。引き分けた場合の得点は全て1点または無得点であり、また負けた場合は全て無得点であった為、それらについては相関分析を行わず、勝ったチームのみ分析を行った。その結果、勝ったチームの中で大量に得点したチームの特徴は、コート全体でドロネー・パス数が多いということであった。相手チームからボールを奪い、シュートに結びつけるまでに、より多くの確実に繋がるパス（ドロネー・パス）が含まれていることが、大量得点に繋がっていると考えられる。

最後に、ポゼッション率と各パス数との関係を分析した。何れのパス数もやや強い正の相関が見られたが、ドロネー・パス数と非ドロネー・パス数の両方で、重み付けをしたパス数の方がポゼッション率との相関が強かった。これは、相手ゴール付近では相手ディフェンダーにボールを奪われやすいので、そこで

パスが通りやすいということがポゼッション率を上げているものと思われる。また、ポゼッション率50%以下のチームでは各パス数が少なく、逆に50%以上では各パス数が比較的多かった。そしてこれについても、重み付けをしたパス数の方が顕著であった。

今後の研究としては、サッカーJリーグの試合データを用いた分析や守備に関する指標の開発、個々の選手に関する指標開発などが挙げられる。

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 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, 2019, 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, 「ドロー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, 2019, pp.9 ~ 15.
- 12) 青木優, 「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」, 『スポーツと人間』, 第4巻, 第1号, 2019, pp.17 ~ 23.
- 13) RoboCupSoccer Simulation 2D ログ データ, <http://archive.robocup.info/Soccer/Simulation/2D/> (accessed Mar. 31, 2021).