

マルコフモデルを用いたフットサルの試合分析

小池光太郎, 田口 東

本研究ではフットサルのモデルを作成し、それを用いて試合の分析を行う。まず、実際のフットサルの試合をビデオカメラで撮影して、データを作成する。そして、フットサルマルコフモデルを作成するために、状態空間を定義して、データから状態間の推移数を集計し、集計結果から推移確率行列を決定する。次に、フットサルマルコフモデルを用いて試合のシミュレーションを行い、実際の試合と比較して、試合を再現できていることを検証する。検証後、シミュレーションから試合の特徴を定量的に分析し、勝敗の分かれ目となる要因を考察する。そして、その要因が試合に与える影響を定量的に調べる。

キーワード：マルコフ過程、平均パス回数、得点確率

1. はじめに

ここ数年で、日本国内でフットサルが急速に普及している。競技人口は、2002年の頃には10万人であったのに対し、現在は50万人から100万人いると言われている。しかし、サッカーなどのメジャースポーツと比べると、まだマイナースポーツである。プロ化もされておらず、日本リーグの発足が検討中である。

フットサルは、サッカーに似たスポーツで、5人制のサッカーを想像すると分かりやすい。しかし、ルールは異なる部分が多い。例えば、フットサルは選手交代が何回でも可能である。また、スローインがなく、足で行うキックインにより試合を再開する。ピッチの面積はサッカー(105m×68m)の約40%であり、攻守の入れ替わりが頻繁で、サッカーと比べて試合展開が速く、点が入りやすい。フットサルの概要は2節で説明する。

フットサルも他のスポーツと同様に、チームの強さが語られることがある。しかし、一般にそれは直感的なものであって、戦力を定量的に分析する、といった研究はあまり行われていない。

本研究では、マルコフモデルを用いたサッカーの試合の分析にならい、フットサルの試合へのマルコフモデルの適用を試みる。そして、作成したモデルを用いて、FIRE FOXというチームを中心に試合の定量的

な分析を行う。FIRE FOXは、2004年4月から2005年3月のシーズンにおいて、全日本フットサル選手権、日本で最もレベルが高いリーグである関東リーグ、各地域の上位が集まる地域チャンピオンズリーグの3冠を達成した強豪チームである。

2. フットサルの概要

本節では、フットサルについて簡単に説明する。詳細は <http://futsal.jfa.or.jp/index.php> (日本フットサル協会) を参照されたい。

フットサル(FUTSAL)は、1994年にFIFA(国際サッカー連盟)がそれまでは各地域で様々な形式で行われていた少人数によるサッカーをルール統一し、定義したスポーツである。

まず、ポジションについて説明する。フットサルでは、ピヴォ(P), アラ(A), ベッキ(B), ゴレイロ(G)の4つのポジションが存在する。アラは2人いるので、区別するためにアラ1(A1), アラ2(A2)とし、ピッチには5人の選手が存在する(控えの選手は公式ルールでは7人まで許される)。ゴレイロを除いたフィールドプレーヤーは、各々のポジションに留まらず、流動的にポジションをチェンジしている。以下で各ポジションの役割を簡単に説明する。

ピヴォ：前線に位置し、ポストプレーやシュートなど攻撃の起点となることが多い。

アラ：両サイドに位置し、前後の動きが多く、スピードとスタミナが要求される。

ベッキ：後方に位置し、攻守においてゲームをコントロールする。

ゴレイロ：サッカーのキーパーと同じ役割で

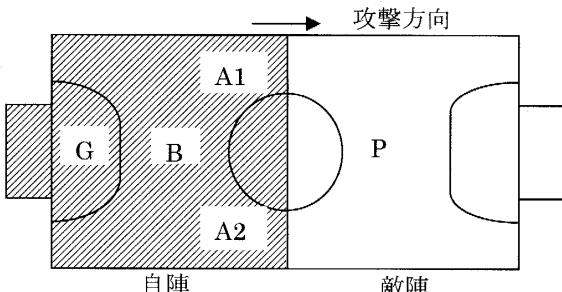


図1 フットサルの基本ポジション

ある。

各ポジションの基本的な位置を図1に示す。

3. フットサルマルコフモデル

本節では、フットサルの試合を表現するフットサルマルコフモデルを文献[2]に基づいて説明する。

3.1 マルコフモデルと推移確率行列

マルコフモデルはマルコフ性をもった確率過程である。マルコフ性とは、「時点 n で状態 i にいたとき、つぎの時点 $n+1$ に状態 j へ推移する確率が、時点 $n-1$ 以前の状態とは無関係である」という仮定である。状態は、時点 n における確率過程 X_n がとりうる値のことで、すべての状態の集合を状態空間という。状態 i から状態 j へ推移する確率 p_{ij} を行列の形に並べた推移確率行列 P によって推移の構造を表現することができる。

3.2 高次の推移確率と時点 n における状態確率

時点 n ($n=0, 1, 2, \dots$) で状態 i にいたとき、 m ステップ ($m=1, 2, \dots$) 後の時点 $n+m$ で状態 j にいる確率 $p_{ij}^{(m)}$ は

$$p_{ij}^{(m)} = \sum_{k=1}^N p_{ik}^{(m-1)} p_{kj} \quad (N \text{ は状態数}) \quad (1)$$

で与えられる。式(1)を行列で表すと

$$P^{(m)} = P^{(m-1)} P \quad (2)$$

となり、式(2)より

$$P^{(m)} = P^m$$

が与えられる。

時点 n で状態 i にいる確率 $P\{X_n=i\}$ を $q_i(n)$ とし、 $q_i(n)$ を行ベクトルの形に並べた

$$\pi(n) = (q_1(n), q_2(n), \dots, q_N(n))$$

を時点 n における状態確率分布という。特に、 $n=0$ のときの分布 $\pi(0)$ を初期分布という。

3.3 吸収的マルコフ連鎖

吸収的マルコフ連鎖は、ある状態に一度推移したら、それ以降はその状態に留まり続ける吸収状態と、それ

以外の、吸収状態へ到達する途中に通過する一時的状態という2種類の状態をもつマルコフ連鎖のことである。吸収的マルコフ連鎖における以下の3つの量が重要である。

平均訪問回数：一時的状態 i から出発したマルコフ連鎖が、いずれかの吸収状態に推移するまでに一時的状態 j を訪問する平均回数。

吸収確率：一時的状態 i から出発したマルコフ連鎖がいつかは吸収状態 j に推移する確率。

平均吸収時間：いずれかの吸収状態に推移するまでの平均ステップ数。

3.4 フットサルマルコフモデルの作成

まず、状態空間を定義する。選手を個人ではなく、プレイしているポジションとみなし、「ピヴォがボールを保持している」というように、各ポジションの選手がボールを保持している状況を状態とする。したがって、ボールが別のポジションの選手に移動したとき、状態が推移する。そして、各選手が自陣、敵陣にいる場合を区別して、これらを一時的状態とする（ポジション数×2（自陣、敵陣）×2チーム=20状態）。ここで、自陣、敵陣と分けたのは、自陣と敵陣では、つなぎのパスや勝負をしかけるパスを用いる割合が異なるからである。次に、各チームの得点、シュートでプレイが途切れる状況、その他でプレイが途切れる状況を吸収状態とする（4状態）。吸収状態をまとめてPlay offと呼ぶ。以上から24状態からなる状態空間を定義する。

次に、定義した状態空間に従い、実際の試合から状態間を推移する回数を集計し、推移確率行列（24次の正方行列）を作成する。また、Play offからプレイが再開されるとき、各選手から再開される回数を集計して、推移開始時の初期状態の分布を計算する。以上より、フットサルマルコフモデルが完成する。

ここで、本研究で用いるデータについて述べる。使用データは、第10回全日本フットサル選手権東京都大会の準々決勝、準決勝、決勝の3試合で、いずれも試合会場にてビデオカメラで撮影したものである。3試合の総推移数の平均は約1,140ステップである。3試合の対戦チームを以下に示す。

1. 準々決勝：FIRE FOX 対 府中 Athletic F.C
2. 準決勝：FIRE FOX 対 SHARKS
3. 決勝：FIRE FOX 対 CASCAVEL TOKYO

フットサルマルコフモデルでは、3.3節で述べた平均訪問回数を平均パス回数、得点となる吸収確率を得

点確率とする。平均パス回数は、ある選手からスタートし、Play off となるまでに各選手へボールが渡る回数を意味する。ボールの流れに注目した以上の2つの指標を用いて各試合を分析する。

4. モデルの整合性と分析

本節では、フットサルマルコフモデルの整合性について検証した後、FIRE FOXを中心とした各試合の分析を行う。

4.1 モデルを用いた試合のシミュレーション

フットサルマルコフモデルを用いて、次の4つの条件の下で試合のシミュレーションを行う。

- 試合は前半20分、後半20分の計40分行う。
- 延長戦は行わない。
- キックオフ時は自陣のピヴォから開始する。
- ファウルはない。

1ステップの状態推移に要する時間を、試合時間データ集計時の総推移数で割った値とする。試合時間が20分を超えたなら、前半なら前半終了して後半開始、後半なら試合終了としてシミュレーションを終了させる。吸収状態へ推移したときは、モデルの推移を終了させ、初期分布を用いてモデル再開時の一時的状態を決める。シミュレーションの流れを図2に示す。

3試合それぞれについて、フットサルマルコフモデルを用いたシミュレーションを100試合ずつ行う。その際に、実際の試合から状態間の推移数を集計したように、シミュレーションの試合から状態間の推移数を1試合ごとに集計する。さらに、スコア、Play offまでに要する平均ステップ数、平均パス回数、得点確率の100試合分の平均と標準偏差を算出する。

まず、スコアと平均ステップ数を用いて、シミュレ

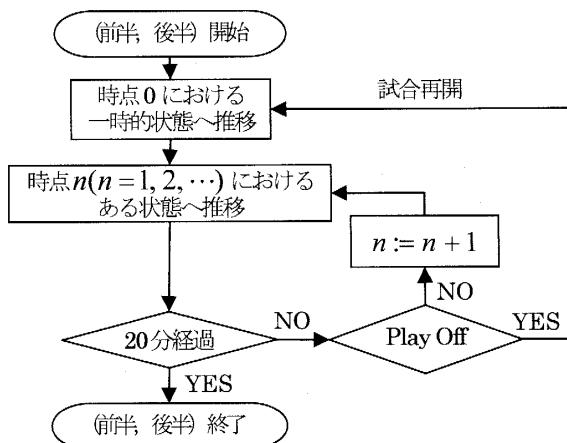


図2 シミュレーションの流れ

ーション結果と実際の試合と比較する。結果を表1に示す。平均ステップ数は、3.3節で述べた平均吸収時間に相当する。括弧内の数値は標準偏差を表す。

表1より、平均スコア、平均ステップ数のシミュレーション結果と実際の試合結果がよく一致していることが分かる。このことから、フットサルマルコフモデルの整合性は高いことが分かる。

4.2 シミュレーションの試合分析

次に、4.1節で述べた、平均バス回数と得点確率を用いて試合の分析を行う。平均バス回数については、各試合で特徴が見られた、自陣にいる各選手から敵陣にいるピヴォへの平均バス回数に注目する。得点確率については、各選手が敵陣にいるときのみ注目する。図3と図4にFIRE FOX対府中Athletic F.C.の平均バス回数、得点確率を示す。図5と図6にFIRE FOX対SHARKSの平均バス回数、得点確率を示す。図6においてSHARKSの各選手の得点確率が0であるのは、実際の試合で無得点のためである。図7と図8にFIRE FOX対CASCAVEL TOKYOの平均バス回数、得点確率を示す。

4.2.1 FIRE FOX 対府中 Athletic F.C. の分析

図3を見ると、FIRE FOXの各選手のピヴォへの平均バス回数は0.5前後である。これは、各選手がボ

表1 実際の試合(R)とシミュレーション(S)の比較

試合	チーム名	平均スコア		平均ステップ数	
		R	S	R	S
準々決勝	FIRE FOX	5	5.0(2.2)	5.4	5.3(0.4)
	府中 Athletic F.C.	4	3.9(1.9)		
準決勝	FIRE FOX	2	2.1(1.4)	7.0	6.8(0.5)
	SHARKS	0	0.0(0.0)		
決勝	FIRE FOX	4	3.6(2.1)	5.9	5.9(0.5)
	CASCAVEL TOKYO	3	2.8(1.6)		

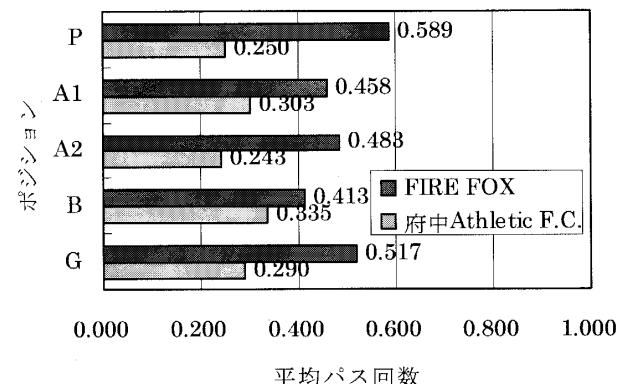


図3 FIRE FOX 対府中 Athletic F.C. の平均バス回数

ールを保持する機会が2回あると、そのうち1回はPlay offになるまでボールが敵陣にいるピヴォを経由していることを示している。対して、府中Athletic F.C.は3、4回のうち1回だけボールが敵陣にいるピヴォを経由していることを示している。FIRE FOXは府中Athletic F.C.よりもより多く攻撃の起点となるピヴォへボールを渡していることが分かる。

図4を見ると、FIRE FOXのピヴォがボールを保持してから得点に至る確率が0.064であり、他と比べて大きい数値を示している。よって、FIRE FOXでは敵陣にいるピヴォは他の選手と比べて得点に絡むことが多い。

4.2.2 FIRE FOX 対 SHARKS の分析

図5を見ると、府中Athletic F.C.戦とは異なり、ボールがFIRE FOXの各選手からピヴォを経由する平均バス回数がSHARKSと互角である。平均バス回数の数値も図2、図5と比べて低いことから、他の試合と比べて、ピヴォが機能していないと考えられる。

図6を見ると、府中Athletic F.C.戦と同様に、FIRE FOXのピヴォを中心に得点確率が高い。FIRE

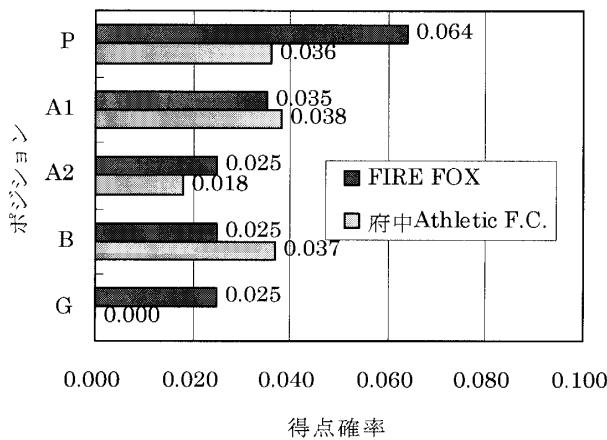


図4 FIRE FOX 対府中 Athletic F.C. の得点確率

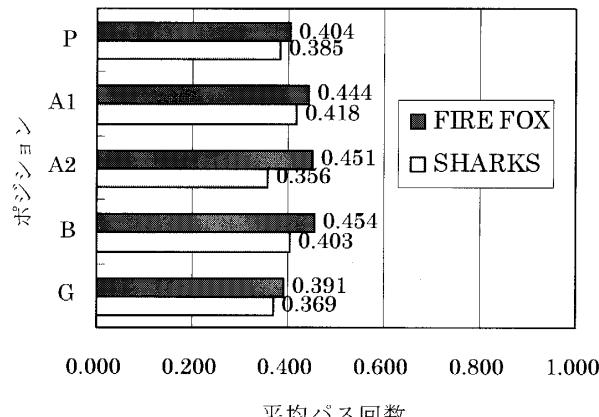


図5 FIRE FOX 対 SHARKS の平均バス回数

FOXは府中Athletic F.C.戦と比べると、敵陣にいるピヴォを得点の起点とし、そのピヴォへ多くのパスを渡せていないため、苦戦していたと推測できる。

4.2.3 FIRE FOX 対 CASCAVEL TOKYO の分析

図7を見ると、対府中Athletic F.C.戦と同様に、FIRE FOXの各選手から敵陣にいるピヴォへ相手よりも多くボールが経由していることが分かる。

図8を見ると、FIRE FOXのアラ2の得点確率が

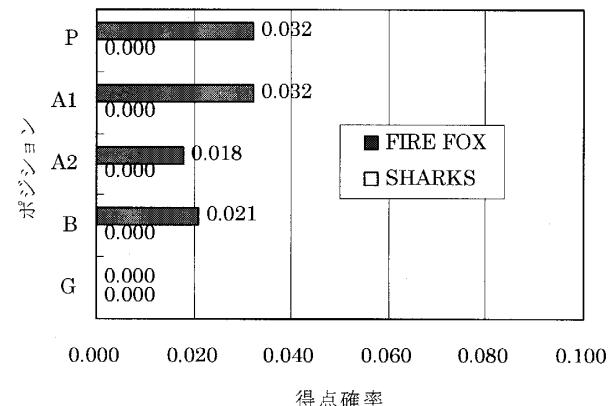


図6 FIRE FOX 対 SHARKS の得点確率

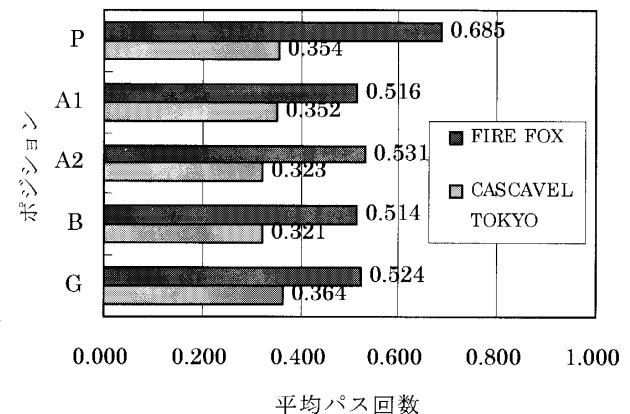


図7 FIRE FOX 対 CASCAVEL TOKYO の平均バス回数

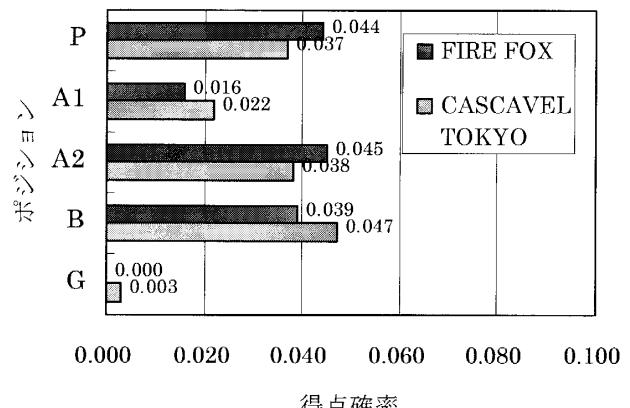


図8 FIRE FOX 対 CASCAVEL TOKYO の得点確率

一番高いが、ピヴォはアラ2とほぼ同じで、中心となって得点に絡んでいることが分かる。

3試合をまとめると、FIRE FOXのピヴォは得点に絡むことが多く、そして各選手からボールがピヴォを経由していることが分かる。これがFIRE FOXが試合に勝利した要因と考えられる。

5. 推移確率を変化させたときのシミュレーション

本節では、FIRE FOXが勝利した要因である、ピヴォに関する確率を変化させ、試合結果に与える影響を調べる。この結果から、ピヴォの活躍を防ぐ戦術の定量的な評価ができる。

次のように、設定1, 2, 3, 4を考える。

設定1：FIRE FOXの各選手から敵陣にいるピヴォへのパスを相手のベッキのみがカットする。

設定2：FIRE FOXの各選手から敵陣にいるピヴォへのパスを、ゴレイロを除いた相手の自陣にいる選手がカットする。

設定3：敵陣にいるFIRE FOXのピヴォから相手のベッキのみがボールを奪う。

設定4：敵陣にいるFIRE FOXのピヴォからゴレイロを除いた相手選手がボールを奪う。

各設定の詳細を述べる。設定1と設定2では、FIRE FOXの各選手がボールを保持している各状態 i (10状態)から、敵陣にいるピヴォがボールを保持している状態へ推移する確率を $p_i(1 \leq i \leq 10)$ とし、 p_i を $0.9p_i$ から $0.5p_i$ まで減らす。そして、設定1では、減らした分だけFIRE FOXの各選手がボールを保持している各状態から、相手の自陣にいるベッキがボールを保持している状態へ推移する確率を増やす。設定2では、減らした分を4等分して、FIRE FOXの各選手がボールを保持している各状態(10状態)から、ゴレイロを除いた相手の自陣にいる各選手がボールを保持している各状態(4状態)へ推移する確率を増やす。

設定3と設定4では、敵陣にいるFIRE FOXのピヴォがボールを保持している状態から、FIRE FOXの各選手がボールを保持している各状態(10状態)へ推移する確率を $p_i(1 \leq i \leq 10)$ とし、 p_i を $0.9p_i$ から $0.5p_i$ まで減らす。設定3では、減らした分だけ敵陣にいるFIRE FOXのピヴォがボールを保持している状態から相手の自陣にいるベッキがボールを保持している確率を増やす。設定4では、減らした分を4等

分して、敵陣にいるFIRE FOXピヴォがボールを保持している状態から、ゴレイロを除いた相手の自陣にいる各選手がボールを保持している各状態(4状態)へ推移する確率を増やす。

設定1, 2と設定3, 4と分けることによって、ピヴォにボールが渡る前に奪うのと、渡った後に奪うのとで違いがあるか調べる。また、設定1, 3と設定2, 4と分けることによって、奪う選手が1人の場合と、複数人の場合との違いを調べる。

各設定において、確率を変化させる前と後のシミュレーション結果を比較する。比較対象は、100試合を行ったときの1試合あたりの得失点差とする。得失点差はFIRE FOXの得点からFIRE FOXの対戦相手の得点を引いた値である。設定1から設定4までの各試合の比較結果を図9から図12に示す。各図の縦軸である得失点差の0より上が、FIRE FOXが多く得点していることを示す。対象とする試合は「FIRE FOX対SHARKS」を除く2試合とする。除いた試合はSHARKSが無得点であり、シミュレーションでも得点することができないので、評価の対象外とした。

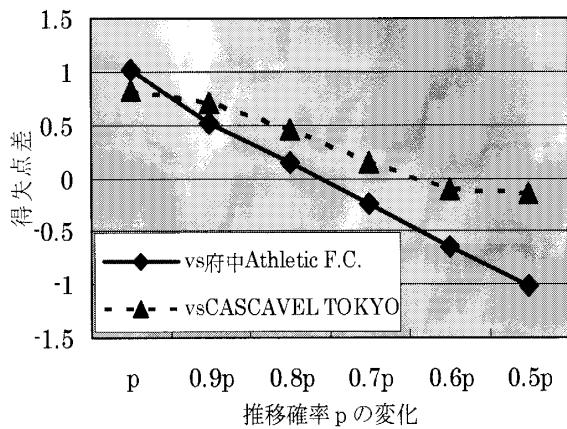


図9 設定1の1試合あたりの得失点差

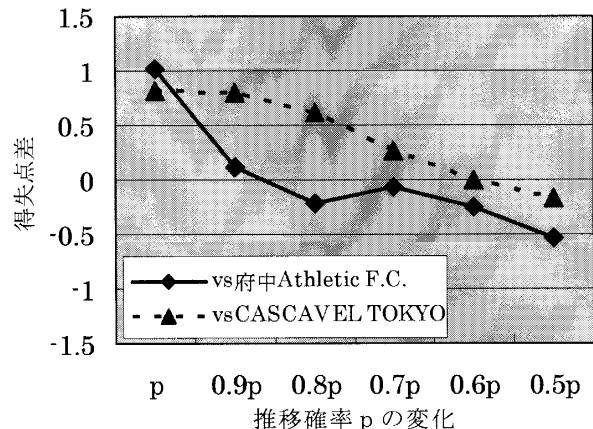


図10 設定2の1試合あたりの得失点差

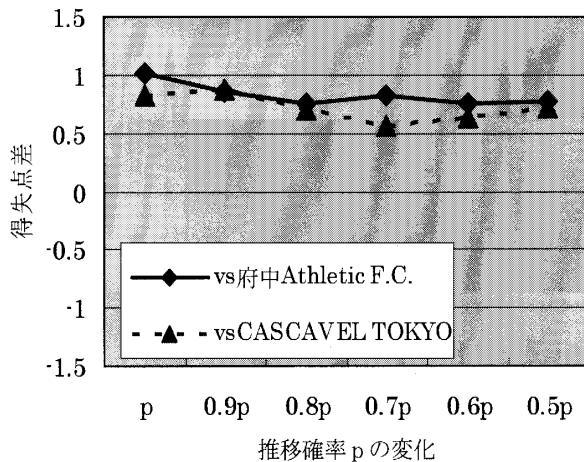


図11 設定3の1試合あたりの得失点差

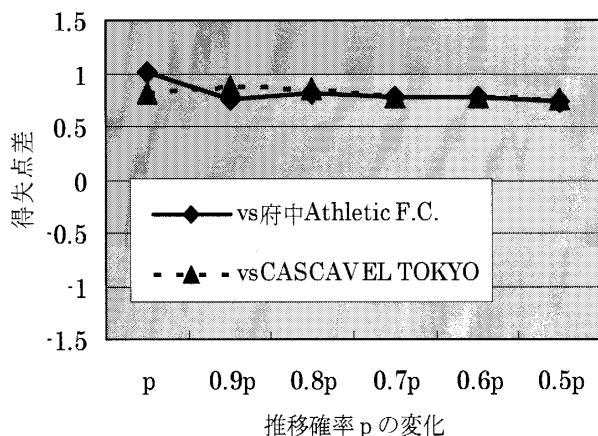


図12 設定4の1試合あたりの得失点差

推移確率を変化させる前の府中 Athletic F. C. 戦と CASCAVEL TOKYO 戦は、FIRE FOX の各選手がボールを保持している状態から、敵陣にいるピヴォがボールを保持している状態へ推移する回数は、前者が 69 回で、後者が 68 回であった。

設定1と設定2の結果について考察する。図9を見ると、設定1では府中 Athletic F. C. は約 0.75p、CASCAVEL TOKYO は約 0.65p まで減少したとき、得失点差が 0 となる。本数にすると、府中 Athletic F. C. は 52 本まで減らし、CASCAVEL TOKYO は 44 本まで減らすことに相当する。図10を見ると、設定2では、府中 Athletic F. C. は約 0.85p、CASCAVEL TOKYO は約 0.6p まで減少させたとき、得失点差が 0 となる。本数にすると、府中 Athletic F. C. は 58 本まで減らし、CASCAVEL TOKYO は 41 本まで減らすことに相当する。これは、1 選手あたり

5 本前後のパスカットをすることに相当する。以上より、府中 Athletic F. C. は、ベッキのみがピヴォへのパスをカットするよりも、ゴレイロを除いた各選手がパスをカットする方が勝利する可能性が高いことが分かる。対して、CASCAVEL TOKYO は、設定1では 44 本、設定2では 41 本とあまり大きな差が見られなかった。

設定3と設定4の結果について考察する。図11と図12を見ると、設定3と設定4の両方とも大きな変化は見られなかった。このことから、ピヴォからボールを奪っても効果が小さいことが分かる。

以上より、本数で見ると、FIRE FOX の対戦相手は、ピヴォからボールを奪うよりも、ピヴォに入るボールをカットした方が勝利する可能性が高い。しかし、ベッキ1人でピヴォからのパスを約20本カットすることは現実では困難であり、ゴレイロを除いた各選手が5本前後カットする方が比較的可能であり、勝利する可能性が高いことが推測できる。

6. おわりに

マルコフモデルを用いることで、フットサルの試合を表現した。そして、モデルから得られる平均パス回数や得点確率で試合内容を定量的に分析し、FIRE FOX が勝利した要因を考察した。それは、ピヴォの能力が高く、得点に絡むことが多いことと、そのピヴォへ各選手がボールを多く経由させることであった。また、FIRE FOX が勝利した要因に関わるいくつかの推移確率を変化させることで、試合結果にどのような影響があるか調べた。その結果、ピヴォからボールを奪うよりもピヴォへのパスをカットすることで、劣勢だった相手が勝機をつかむことが可能となることが分かった。

参考文献

- [1] 廣津信義、マイク・ライト：マルコフモデルを利用したサッカーチームの評価と布陣変更の最適化。2004年オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集、(2004) 234-235。
- [2] 森村英典、高橋幸雄：マルコフ解析—ORライブラリ—18（日科技連出版社、1979）。