論文・事例研究

ボールゲームにおける一対一しかけ評価指標の提案

今村健一郎，筧　康明，河添　健，仰木　裕嗣

1. はじめに

サッカーやバスケットボールなどの対人型ボールゲームは巨視的に見ればチーム間の戦いであるが，微視的に見れば各選手間の一対一が折り重なって構成されたものである．つまり，個人間の一対一がチーム間の質的変化（≒チーム間の状況）に影響を及ぼすミクロ-マクロの関係として捉えることができる．

もし，選手やコーチが，一対一のような個人間の動きとチーム間の質的変化との関係を振り返ることができれば，ある局面での一対一がチームにどのような影響を及ぼしたかということを振り返ることができるだろう．その結果，一対一をチーム間の質的変化との関係から評価できるようになり，ゲームの流れから判断して，この場合に一対一を行うべきか否かという判断の質が向上することが見込まれる．

このようなミクロ-マクロの関係から現象を観察するという方針は，自己組織化現象（self-organization）の理解を目指したダイナミカルシステム理論（dynamical system theory）の観点といえる．自己組織化現象とは，多くの要素の相互作用によって，質的に新たな特徴が巨視的なレベルでもたらされる現象とされている[1]～[3]．

人間の運動や行動に関する自己組織化現象をダイナミカルシステム理論の観点からとらえた典型例としては，人間の二足歩行における「歩行」から「走行」への相転移現象に関する研究が挙げられる[4]．これは，歩行速度を時間とともに増加させることで，足や膝や腰の各関節角度の位相関係が，突如，大きく変化した結果，運動状態が歩行から走行へと相転移するという現象を示した事例である．ここでは，運動の質的変化を時系列的に表す要因を秩序パラメタ，その質的変化を制御する要因を制御パラメタと呼び，制御パラメタの連続的な変化によって秩序パラメタが質的に変化するとされている．この知見を一対一とチーム間の質的変化の関係性に当てはめると，秩序パラメタが「チーム間の質的変化」に相当し，制御パラメタが「一対一」に相当すると考えられる．

現状，集団スポーツであるボールゲームを題材として，ダイナミカルシステム理論の観点からゲームをとらえる研究はいくつか存在するが，理論的な考察が中心的である[5][6]．実戦に適応した例としては，フィールドホッケーにおいて「チームの重心間距離およびボールと距離」という制御パラメタが，「攻撃の成功と失敗」という秩序パラメタにどのように影響しているかを検討した例が見られる[7]．この例は，チーム間の相互作用がゲームの質的変化にどのような影響を及ぼしたのかというボールゲームにおけるマクロ的研究といえる．しかし，ゲームにおける個人間相互作用がチーム間の質的変化にどのように影響するかというミクロ-マクロの関係を検証した研究は存在しない．

その理由として，一対一という個人の詳細な全身運動からチーム全体の運動状態までを統合的に計測することが困難だという物理的制約が挙げられる．運動計測の際によく利用される映像計測では，全体を俯瞰できる視野角で映像を取得しようとすれば，個人の詳細な動きは分析できないし，個人の詳細な動きの映像を取得しようとすれば，全体が俯瞰できないというトレードオフ問題が存在する．センサ計測では，簡易に選手全員の位置および姿勢計測を行うシステムは確立されていないし，そもそも試合中にセンサをつけて計測

いまむら　けんいちろう，おおぎ　ゆうじ
慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科
かけひ　やすあき
慶應義塾大学 環境情報学部
かわぞえ　たけし
慶應義塾大学 総合政策学部
〒252-8520 藤沢市遠藤 5322
受付 10.3.3　採択 10.10.4

はできないという問題がある．

したがって，ボールゲームにおける時系列ゲーム分析では，選手個人は質点で表現され，多人数間の幾何的な関係性を分析するというマクロ的研究が多く[8]～[10]，一対一などの個人の動きを加味したゲーム分析は皆無というのが現状である．

そこで本研究では，ボールゲームにおけるミクロ-マクロ研究への第一歩として，一対一を個人の代表質点間（二点間）の関係から評価するという課題に取り組む．まず，一対一が評価可能になることで，試合中に選手間のマークがずれている度合を定量化することが可能となり，チームプレーにおける個々の評価が可能となるだろう．この応用例として，相手に攻め込まれると危険な領域を可視化呈示してくれるような新たなゲーム分析ツール開発への展開なども考えられる．その後，俯瞰映像の計測から一対一とチームの質的変化の関係性というミクロ-マクロ研究を行うことが可能になるだろう（図1）．

以上を踏まえて，本研究では一対一を個人の代表質点間の関係から評価可能となるような指標の構築に取り組む．

本研究で対象とする一対一の構成を図2に示す．攻者が守者と対峙したのち，手，足，肩，腰など全身を利用したフェイント等を行っている局面を「駆け引き」局面とする．その後，攻者がスピードアップして守者を置き去りにしようと試みる瞬間を「しかけ」と定義した．その結果，相手を「外した（成功）」のか「外せない（失敗）」のかという成功/失敗の二状態へと分岐する．

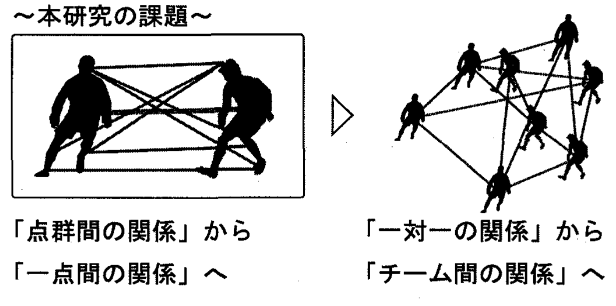


図1　ボールゲームにおきるミクロ-マクロの関係性

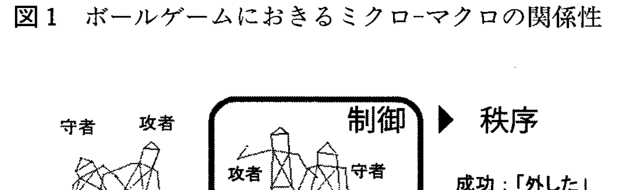


図2　一対一の「駆け引き」から「しかけ」までの構成

本研究において，一対一は「しかけ」時の何らかの制御パラメタにより，秩序パラメタである個人間の質的変化（成功/失敗）が発生するダイナミカルシステムであると捉える．したがって，「しかけ」時の制御パラメタを発見することおよび，制御パラメタと秩序パラメタ（＝成功/失敗）との関係性をモデル化することを目的とする．

スポーツ場面における一対一場面のダイナミカルシステムを検証した研究では，バスケットボールでの一対一場面の駆け引き[11]や，ボクサーのパンチの種類の出現[12]が，対人もしくは対象物との距離に依存して質的に変化するという結果が報告されている．これは，対人や対物間の距離としての制御パラメタに依存して，行動が質的に変化することを示している．これらの知見を考慮し，本研究では一対一における攻者と守者のキネマティクス情報（位置，速度，角度など）を取得することで，一対一を評価する方法について検討していく．

ボールゲームにおける一対一は，ボール有りの状況とボール無しの状況の二パターンが存在するが，例えば，サッカーにおいて，個人がボールを保持している時間帯はゲーム全体の2～3パーセント程度であるという結果があり[13]，実際には，ボール無しの状況で相手との駆け引きを行うというシーンがゲーム中のほとんどを占めている．したがって本研究では，一対一に関する研究の第一歩として，ボール無し状況で攻者と守者の一対一を対象とする．

以上より本研究では，ボール無しの状況の一対一において個人を代表する質点におけるキネマティクス情報の関係性から，一対一のダイナミカルシステムにおける制御-秩序関係を検証するということを目的として，モーションキャプチャシステムを利用した一対一計測実験を行った．

2.　一対一計測実験

2節では，まず始めに2.1節で一対一の動作計測実験の概要について説明する．次に，2.2節で計測した一対一において「しかけ」時刻の算出方法を定義する．最後に，2.3節にて一対一の秩序パラメタである成功/失敗を一対一計測者以外の第三者における主観評価実験から決定する．

2.1 計測条件

一対一計測において，攻者の計測課題は「守者を左右方向に外す」こととして，守者の計測課題は「攻者の左右方向への移動に対して追従する」こととした．移動可能領域は前後左右で3 m×3 mの範囲とし，対象被験者は，競技中で一対一の経験が多いフットサル，バスケットボール，サッカーなどのプレーヤーとした．なお，領域外には出ないという条件で，前後方向の移動は被験者の任意とした．実際のゲームにおいては，左右に限らず前後方向へのしかけも存在するが，本研究では，より簡便な計測条件の設定を目指して左右方向のしかけのみを対象とした．

本研究では，計測した試技中からランダムに抽出した計125試技の一対一を解析対象とした．

一対一は，攻者の移動に対して守者が追従するという移動運動であるため，各身体部位の質量および質量位置の関係性で算出される身体重心が追従できているか否かということが重要だと考えられる．したがって本研究では，個人を表す代表質点として，両者の身体重心の振る舞いに着目して現象を分析していく．

身体重心運動を算出するために，光学式のモーションキャプチャシステム（MotionAnalysis社製MAC3 DSystem）を用いて，一対一の三次元計測実験を行った．計測のサンプリングレートは250 Hz，計測時間は60秒とした．計測したマーカー座標値から，関節中心点15点を特徴点とし，三次元座標を算出した．特徴点15点は，体幹3点（頭頂点，胸郭中心点，骨盤中心点），左右上肢各3点（肩峰点，肘関節中心点，手関節中心点）および，左右下肢各3点（大転子点，膝関節中心点，足関節中心点）とした．図3に示されるような関節中心点と体節リンクモデルを基に，阿江による身体慣性係数[14]を利用して攻者および守者の身体重心を算出した．

2.2 しかけ時刻の定義

しかけ時刻の定義は以下の手順で行った．まず始めに，実時間で取得した三次元映像を再生し，しかけたと判断した瞬間に停止ボタンを押すという作業を三回繰り返し，その平均値をもって仮のしかけ時刻とする．その後，仮のしかけ時刻付近で以下の条件の一方に当てはまる時刻をしかけ時刻とした．1. 攻者の速度が増加しはじめた瞬間（加速度値が10.0 m/sec^{2}を超えた瞬間とした），2. 速度の符号が変わった瞬間（速度値が0になった瞬間とした）．ちなみに両条件を満たす場合は，時刻の遅い方を仕掛け時刻として採用した．

2.3 成功/失敗判別のための主観評価実験

しかけの成功/失敗を判別するために，被験者31名に対して125試技の一対一の三次元映像を視聴してもらい，「攻者は成功した（外した）のか，それとも失敗した（外せなかった）のか」という二択で回答を得た．各試技において，何人の被験者が成功と判断したかという割合を「主観成功率」と定義する．例えば，31名中17人が，ある一対一試技を成功したと判断した場合，主観成功率は0.55（=17/31）である．本研究では，この主観成功率を一対一の秩序パラメタと同義とする．

3. 結果

3.1 制御パラメタの探索

成功/失敗に影響を与える制御パラメタを探索するという目的で，モーションキャプチャで計測した三次元映像と計測データを観察した．ここでは，三種類の特徴的なしかけパターンA，B，Cを図4～7に示す．パターンAの図4とパターンBの図5は，3試技目と29試技目の左右方向の重心速度波形であり，パターンCの図6，7は，81試技目の左右方向の重心速度波形と重心位置波形を示している．

パターンA　～左右への揺さぶりで外す～

図4に3試技目の攻者と守者の左右速度波形グラフを示す．図中，0.48～0.88 secの時間帯で左側へ行くような揺さぶりをかけた後，0.92 sec付近で右側へし

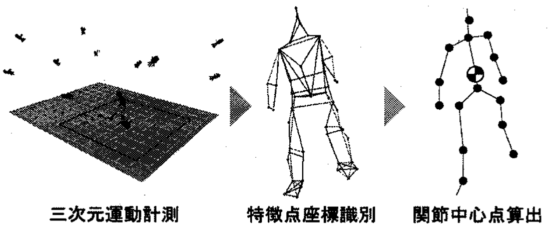


図3　一対一駆け引きの計測からデータ処理の流れ

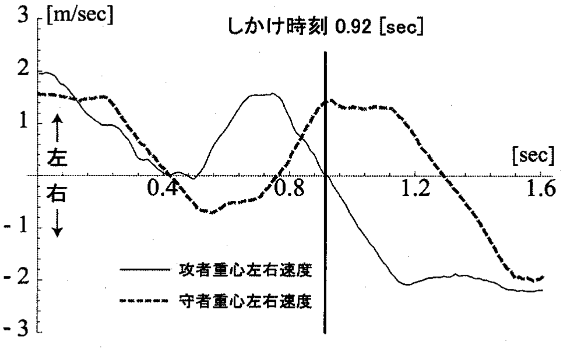


図4　攻者と守者の重心左右速度波形[3試技目]

かけた．この際のしかけ時刻は，速度方向が左から右へと転じた瞬間とした．しかけの際に攻者が右方向に速度値であるのに対して，守者は左方向の速度であるため，この試技は攻者が守者を左に揺さぶることで外した試技といえる．この試技の主観成功率は0.77であった．

パターンB　〜速度の緩急で外す〜

図5に29試技目の攻者と守者の左右速度波形グラフを示す．図中，しかけ時刻の前に左右方向への大きな揺さぶりはなく，しかけ時刻0.80 secで右方向へしかけている．しかけ時刻以降，守者は攻者と同じ方向に動いてはいるが速度差が大きく，守者は攻者に全く追いついていないことが読み取れる．したがって，この試技では，攻者が一気に速度を増加させることで守者を外した試技である．この試技の主観成功率は0.87であった．

パターンC　〜しかける位置が悪い〜

図6に81試技目の攻者と守者の左右速度波形グラフを示す．しかけ時刻1.69 sec以降，攻者が左方向に大きな速度値をとることで，守者と攻者の速度差が大きくなっていることがわかる．しかし，この際の主観成功率は0.36と非常に低かった．

この理由は図7に示す左右位置波形グラフから明らかだが，しかけ時刻1.69 secで攻者が守者から見て0.5 m程度左にいるにもかかわらず，守者に対して右方向へとしかけた結果である．

また，図4, 5のしかけ時刻以降の攻者と守者の左右速度差（相対速度）を比較すると，互いに2.0 m/sec以上程度の大きな値である．したがって，「左右への揺さぶりで外す」という方略，「速度の緩急で外す」という方略のように異なるしかけ方略であっても，左右相対速度を大きくするという共通の条件が，しかけ成功に影響を与えていると考えられる．ただし，図6に示すパターンCのように，しかけ時刻以降の左右速度差が，パターンA，Bと同程度でありながら，しかけ時の左右相対位置関係を誤るとしかけは成功しないことがわかった．以上より，一対一計測実験では，しかけの成功/失敗に影響を与える制御パラメタとして，重心間左右相対速度および重心間左右相対位置に着目する．

3.2　重心間左右相対位置/速度と主観成功率の関係

重心間左右相対位置（cgP_{Rel}: *Relational Center of Gravity Position*）および重心間左右相対速度（cgV_{Rel}: *Relational Center of Gravity Velocity*）は，守者（*DF*）に対する攻者（*OF*）の相対位置および相対速度として次式(1)，(2)のように定義する．

$$cgP_{Rel}[t] = cgP_{OF}[t] - cgP_{DF}[t] \quad (1)$$

$$cgV_{Rel}[t] = cgV_{OF}[t] - cgV_{DF}[t] \quad (2)$$

パターンCで観察したように，攻者が守者から見て右方向にしかけた場合，攻者はしかけ始めから右方向にいる方が外しやすいということがわかっている（図8）．つまり，攻者のしかける方向（左右）に得手/不得手がないと仮定すると，守者から見て左方向にしかける場合は，守者から見て左側にいる方が良いということである．

この結果を加味して，守者に対する攻者の重心間左右相対位置（cgP_{Rel}）が，しかけた方向（重心間左右相

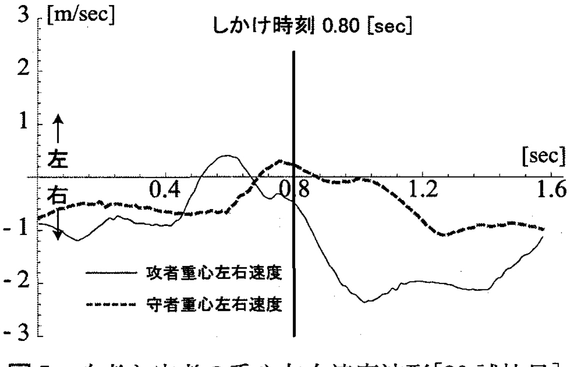


図5　攻者と守者の重心左右速度波形[29試技目]

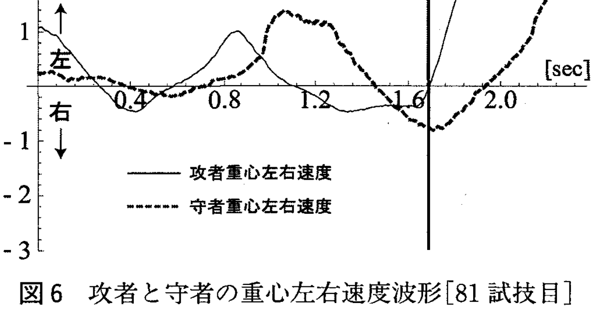


図6　攻者と守者の重心左右速度波形[81試技目]

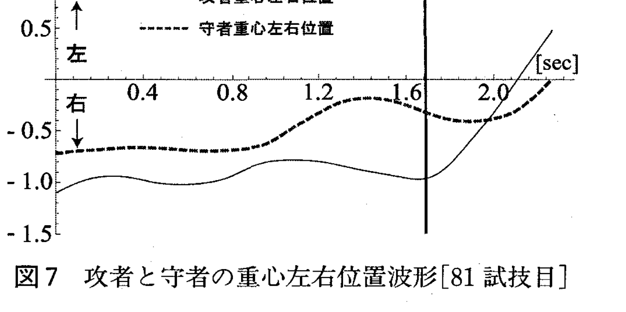


図7　攻者と守者の重心左右位置波形[81試技目]

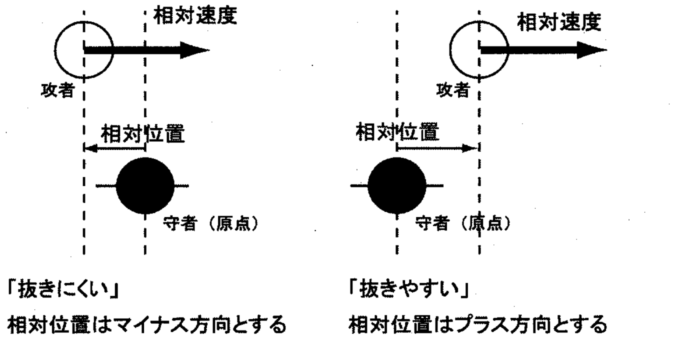


図 8　相対速度と相対位置の符号に関する概念図

対速度(cgV_{Rel})が正になる方向）と同方向の場合は相対位置の符号がプラス，逆方向の場合には相対位置の符号がマイナスになるように修正する．

修正された重心間左右相対位置は cgP'_{Rel} とする．符号の修正は，式(3)のように定義された重心間左右相対速度の単位ベクトル（norm：normalized vector）と修正前の重心間左右相対位置(cgP_{Rel})の内積により式(4)のように算出される．なお，ここでは，重心間左右相対速度の増加方向を基準とするため，重心間左右相対速度は常にプラスをとるものとし，式(5)に示すように重心間左右相対速度(cgV_{Rel})の絶対値を修正後の重心間左右相対速度(cgV'_{Rel})と定義した．なお，式(3)，(5)中の Abs は絶対値を表している．

$$norm[t]=cgV_{Rel}/Abs[cgV_{Rel}[t]] \tag{3}$$

$$cgP'_{Rel}[t]=norm[t]\cdot cgP_{Rel}[t] \tag{4}$$

$$cgV'_{Rel}[t]=Abs[cgV_{Rel}[t]] \tag{5}$$

また，実際の計算過程ではノイズによる変動を小さくする目的で，定義したしかけ時刻後の 0.04 秒間（20 フレーム幅）の平均値をもって「相対位置特性(CGP_{Rel})」，「相対速度特性(CGV_{Rel})」とし，それぞれの特性値を式(6)，(7)のように定義した．

$$CGP_{Rel}[T]=\frac{1}{20}\sum_{t=T}^{T+20} cgP'_{Rel}[t] \tag{6}$$

$$CGV_{Rel}[T]=\frac{1}{20}\sum_{t=T}^{T+20} cgV'_{Rel}[t] \tag{7}$$

なお，ここでは，人が運動刺激に対して反応・認知する際に，「0.04 秒以下の間隔で呈示された運動刺激はグルーピングされ 1 つの刺激として処理される」という心理学的知見[15]を参考に，0.04 秒間の平均値をしかけ時刻という瞬間の特性としても認知的な違和感はないと判断し，時間幅 0.04 秒の平均値を採用した．相対位置特性(CGP_{Rel})および相対速度特性(CGV_{Rel})に基づき，全 125 試技の一対一における重心間左右相対位置および速度を算出した結果を図 9 に示す．図中

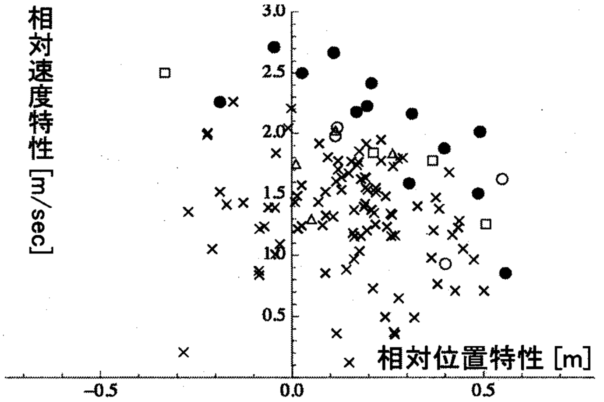


図 9　相対位置/速度特性と主観成功率の 2 D プロット

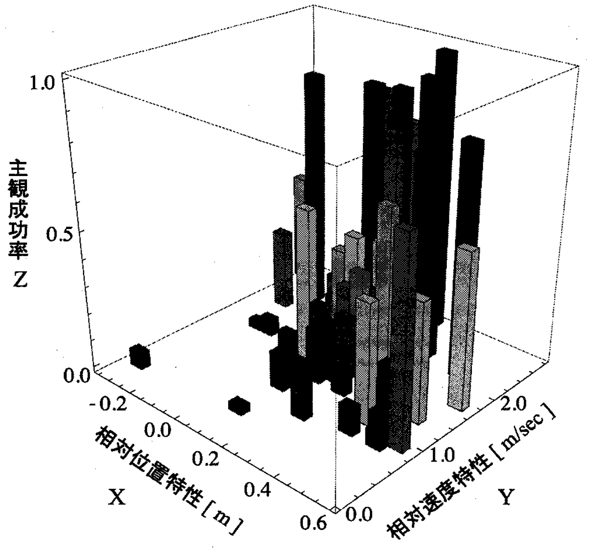


図 10　相対位置/速度特性と主観成功率ヒストグラム

のプロットマーカの種類は主観成功率に基づき，×が 0 以上 0.3 未満，△が 0.3 以上 0.4 未満，□が 0.4 以上 0.5 未満，○が 0.5 以上 0.6 未満，●が 0.6 以上 1 以下とした．それぞれの個数は×が 102 個，△が 3 個，□が 5 個，○が 2 個，●が 13 個であった．図 9 より，主観成功率が 0.6 以上の●プロットにおいて，相対位置特性（X 成分）と，相対速度特性（Y 成分）の間には負の比例関係があることが定性的に確認された．また，主観成功率 0.3 以上 0.6 未満である△，□，○プロット間の間にも，負の比例関係があることが定性的に確認された．

次に主観成功率の詳細を観測することを目的として，X 軸を相対位置特性，Y 軸を相対速度特性，Z 軸を主観成功率としたヒストグラムを図 10 に示す．図 10 の左側の X，Y 成分ともに小さい値である領域では，主観成功率が非常に小さい値であることが確認された．このヒストグラムは図 9 の×プロットに対応している．また，図 10 においてヒストグラムが密集している中

央領域では主観成功率の変化率が非常に大きい．そして，右側のX，Y成分ともに大きい値である領域は，図9の●プロットに対応しており，主観成功率は非常に高いことが確認された．

4．一対一しかけ評価指標の構築

4節では，制御パラメタとしての相対位置/速度特性から秩序パラメタとしての主観成功率に適合する数理モデルを構築し，身体重心という代表質点のみから一対一の成功/失敗を推定することに取り組む．

この課題は，成功/失敗のどちらのグループに判定されるかを相対位置/速度特性から推定する判別問題と同義である．したがって本研究では，目的変数が質的データの場合の判別分析であるロジスティック回帰分析による数理モデル化を行う．

式(8)はロジスティック関数を表しており，説明変数X，Yの合成変量xと範囲0～1に値をもつ発生確率$\Pr(x)$とをロジスティック関数で関連づけたモデルである．XとX，Yの関係式を式(9)に示す．相対位置特性X，相対速度特性Yに対しパラメタβ_0，β_1，β_2を適切に設定することで，主観成功率がロジスティック関数$F(x)$に基づく発生確率$\Pr(x)$により近似される．

$$\Pr(x)=F(x)=\frac{1}{1+\exp(-x)} \quad (8)$$

$$x=\beta_0+\beta_1X+\beta_2Y \quad (9)$$

ここで，式(8)のxは$F(x)$に関する成功率と失敗率の比（オッズ）の対数であるロジット関数（*Logit*）[16]を用いて式(10)のように表せる．

$$Logit(F(x))=\ln\frac{F(x)}{1-F(x)}=x \quad (10)$$

式(10)に式(9)を代入すると

$$Logit(F(x))=\beta_0+\beta_1X+\beta_2Y \quad (11)$$

となる．ここでパラメタ値がβ_0，β_1，β_2という条件付きで，発生確率$F(x)$（$=\Pr(x)$）と主観成功率が，全125試技で一致する確率は，二項分布のコンビネーション項を取り除いた次式(12)となる[17]．

$$\Pr\{F(x)=z|\beta_0,\beta_1,\beta_2\}=\prod_{i=1}^{125}F(x_i)^{zi}(1-F(x_i))^{1-zi} \quad (12)$$

この式(12)を，主観成功率が与えられた条件のもとでのパラメタβ_0，β_1，β_2に関する尤度関数（*like*）として，以下のように定義する．

$$like(\beta_0,\beta_1,\beta_2)=\prod_{i=1}^{125}F(x_i)^{Zi}(1-F(x_i))^{1-Zi} \quad (13)$$

尤度関数（式(13)）を最大化することは，発生確率$F(x)$と主観成功率の一致度合いを最大にすることと同義である．したがって以降では，尤度関数（*like*）を最大化するパラメタ（β_{0ML}, β_{1ML}, β_{2ML}）の算出に際して，最尤推定法によりパラメタの算出を行った[17]．

最尤推定法の計算における連立方程式を解く際には，Taylor展開により線形近似を行い，Newton-Raphson法[18]による繰り返し収束法を行った．一連の数値計算は，Mathematica 7（Wolfram Research, Inc.）を利用して行った．各パラメタおよび数理モデルF_{ML}を式(14)～(17)に示す．

$$\beta_{0ML}\cong-8.643 \quad (14)$$

$$\beta_{1ML}\cong5.369 \quad (15)$$

$$\beta_{2ML}\cong3.723 \quad (16)$$

$$F_{ML}\cong\frac{1}{1+\exp(8.643-5.369X-3.723Y)} \quad (17)$$

ここで，$Z=F_{ML}$の表す曲面と主観成功率のヒストグラムを重ねたものを図11に示す．

このように，数理モデルF_{ML}は主観成功率の傾向をよく表していることが定性的に把握できる．また，定量的な評価を目的とし，各パラメタの有意性を調べるためのWald検定を行った．β_0，β_1，β_2に対するZ値（パラメタ推定値を標準誤差で割ったものの絶対値）は，11.04，7.52，10.14となり，1%水準で有意となるための基準値2.58よりも大きな値であるため，各パラメタの有意性が確認された．また，パラメタβ_1，β_2がともに正であるということは，相対位置特性および，相対速度特性が大きいほど，オッズ比が増加すること，つまり，数理モデルF_{ML}が上昇するこ

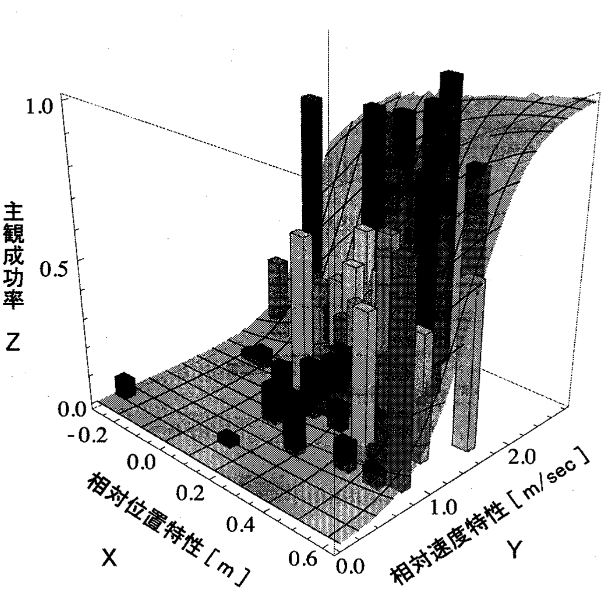


図11　主観成功率と数理モデルF_{ML}の比較

とを表している．この結果は，事実と一致する見解であり十分に妥当な結果といえるだろう．

次に，数理モデル F_{ML} の主観成功率に対する適合度を式(18)に示す自由度調整済み決定係数 R^2 を用いて算出する．

$$R^2=1-\frac{n-1}{n-k-1}\left(1-\frac{S_{F_{ML}}}{S_z}\right) \tag{18}$$

式(18)中の k は説明変数の数，n は標本数を表す．今回は，$k=3$，$n=125$ である．$S_{F_{ML}}$，S_z は，数理モデル F_{ML} と主観成功率の標本分散を表す．この結果，$R^2=0.825$ と非常に適合度の高いモデルであることが定量的に確認された．

以上より本研究では，式(17)に示す数理モデル F_{ML} を「一対一しかけ評価指標」とする．

5. 考察

5.1 評価指標の検証

3節で観察したパターンA～Cの相対位置特性 CGP_{Rel}，相対速度特性 CGV_{Rel}，主観成功率（実測値），しかけ評価指標（推測値）をしかけ特性として表1に示す．また，しかけた瞬間の相対位置，相対速度関係を図12に示す．

3試技目（パターンA）は，「左右への揺さぶり」により守者を外した試技である．攻者がしかけた位置は，仕掛けによる移動方向と反対方向であるが，守者に対する距離は0.046 m と非常に小さく，また相対速度が2.702 m/sec と非常に大きいため，数理モデル F_{ML} によるしかけ評価指標値は0.763と高い値であった．この推定値は，主観成功率0.774と非常に近い値である．

表1 パターンA～Cのしかけ特性比較

種別［試技番号］	相対位置特性	相対速度特性	主観成功率	しかけ評価指標
パターンA [3]	- 0.046	2.702	0.774	0.763
パターンB [29]	0.197	2.217	0.871	0.661
パターンC [81]	- 0.331	2.503	0.387	0.250

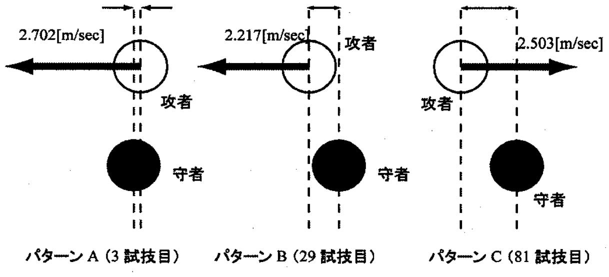


図12 パターンA～Cの相対位置/相対速度関係図

29試技目（パターンB）は，「速度の緩急で外す」という方略の試技である．攻者がしかけた位置は，しかけによる移動方向と同方向であり，距離は0.197 m であった．また，相対速度も2.217 m/sec と大きな値をとっていた．したがって，しかけ評価指標値 (F_{ML}) は0.661と高い値であった．主観成功率は0.871としかけ評価指標値よりも大きな値であった．

81試技目（パターンC）は，攻者の「しかける位置が悪い」例である．この場合，相対速度は2.503 m/sec と成功試技であるパターンBよりも大きな値をとっているが，しかけた位置がしかけによる移動方向と反対の方向，つまり，守者に対して0.331 m 程度離れていたため，しかけ評価指標値は0.250と低い値であった．また，主観成功率も0.387と低い値であった．

以上の考察より，構築された数理モデル F_{ML} に基づく一対一しかけ評価指標は，パターンA～Cの特性をしっかりと捉えていることが確認できた．

5.2 評価指標の精度限界

横軸を駆け引き125試技の試技番号，縦軸を主観成功率 z としかけ評価指標の標準化残差絶対値としたグラフを図13に示す．ここで，各試技における残差絶対値を全125試技における残差標準偏差で割った値を標準化残差絶対値とした．5.2節では，標準化残差絶対値が2.0以上，つまり95%信頼区間外の値を「外れ値」とし，外れ値の考察から評価指標の精度限界について検証する．標準化残差絶対値が2.0以上の試技は5試技あった（35，41，76，94，97）．

この5試技の試技特性として，相対位置特性，相対速度特性，主観成功率 z，しかけ評価指標を表2に示す．

この表より，試技番号35，76，94，97は，しかけ

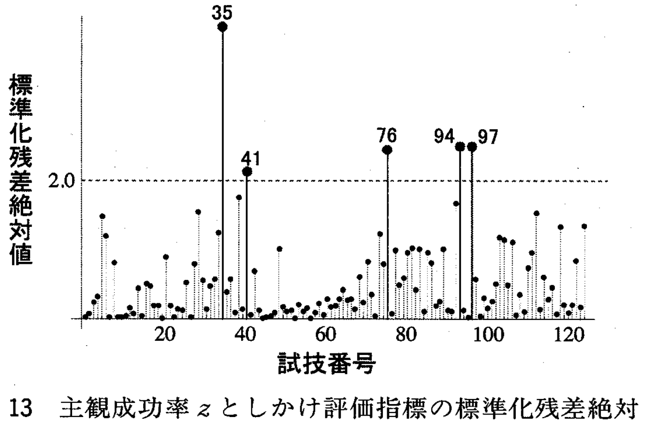


図13 主観成功率 z としかけ評価指標の標準化残差絶対値

評価指標から算出される値よりも主観成功率 z が高く，試技番号41は，しかけ評価指標から算出される値よりも主観成功率 z が低いことが確認される．以降，前者をグループA，後者をグループBとして実際の現象を観察していく．

グループAの場合（試技番号：35，76，94，97）
「守者の姿勢が崩れている」

試技番号35，76，94，97に共通する要因として，攻者がしかけた瞬間の守者の姿勢が崩れていることが挙げられる．図14(a)～(d)に攻者がしかけ時刻の攻者と守者の3DCGを示す．35番試技では，攻者がしかけ方向に対して，守者が背を向ける姿勢になっている．76，94番試技では，攻者がしかけ方向の反対方向に守者の姿勢が倒れてしまっている．97番試技では，守者が攻者を揺さぶるために足を踏み込んだ方向と，攻者がしかけた瞬間が偶然にも一致してしまった．以上の理由よりこれら4試技では，しかけ評価指標が主観成功率 z よりも高い値をとったと考えられる．

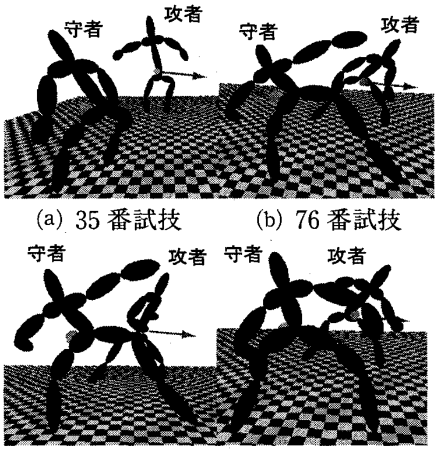
グループBの場合（試技番号：41）
「守者の姿勢が良い」

試技番号41（図15）は，しかけ評価指標値から，39.8%で仕掛け成功と判断されるが，主観成功率 z は6.7%であった．実際は，攻者が適切な相対位置で，駆け引き成功に十分な相対速度でしかけることができているため，しかけ評価指標予測される値が正しい．主観成功率 z が低くなっている理由としては，外されたにもかかわらず，守者が慌てることなく，姿勢を崩すことなく追従しているためと考えられる．

以上5試技の考察より，主観的に外したと判定する材料として，しかけ時刻における相対位置/速度特性に加え，守者の姿勢が影響を与えているということが示唆された．ただし，守者の姿勢を把握して一対一評価指標の精度を上げるためには，計測すべき身体特徴点の数を増やす必要があり，一対一を代表質点間の関係から簡便に評価するという本研究の目的からずれてしまうこととなる．したがって，代表質点間の相対速度および相対位置の関係から一対一をある程度の高精度で評価できるものの，姿勢変化を考慮できないという点が，本簡易指標の限界だといえるだろう．

表2　標準化残差絶対値が2.0以上の試技特性

試技番号	相対位置特性	相対速度特性	主観成功率z	しかけ評価指標
35	0.558	0.844	0.733	0.076
41	0.290	1.792	0.067	0.398
76	- 0.187	2.251	0.600	0.220
94	0.307	1.578	0.633	0.246
97	0.401	0.928	0.433	0.046



(a) 35番試技　(b) 76番試技
(c) 94番試技　(d) 97番試技
図14　しかけ時刻の姿勢比較

5.3　評価指標の汎用化にむけて

本評価指標の要点は，一対一において左右方向に「外す」確率を，両者の相対速度および相対位置から算出するというものである．5.3節では，指標をより一般的なボールゲーム映像に対しての分析に利用するための課題を整理した．

5.3.1　被験者の能力差による影響

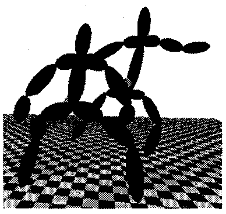
同一の相対速度および相対位置条件であっても，外されない守者もいれば，外されてしまう守者もいるということが考えられる．この問題解決の方針としては，各選手の瞬間的な加速能力を加速度特性として，評価指標のパラメタとして考慮することなどが考えられる．

5.3.2　前後方向を考慮する必要性

現状，左右方向への評価のみを行っているが，実際のゲーム分析においては，前後方向の相対速度および相対位置関係は無視できない要因である．

5.3.3　競技種目による差異

競技種目による差異は，どの程度のマークの「ずれ」まで許容するかという閾値の問題と考えられる．「ずれ」がある閾値を超えた場合に，攻守の関係は「外れた」状態と見なされる．



(a) 41番試技
図15　前後方向に仕掛けている例

以上を踏まえると，外されたか否かという成功/失敗の判別は，競技種目によりその閾値は変化するものの，その判断のための全競技に共通の不変量である「ずれ」という定量値を相対位置，相対速度および各選手の加速度モデルから算出することが重要だといえるだろう．そして，「ずれ」を算出する際に前後方向を考慮して算出することができれば，実際のゲーム分析にも生かせる一対一評価指標となると考えられる．

6. まとめ

本研究で行った3 m×3 m四方の一対一計測実験より，しかけ時刻における相対位置および相対速度を把握することで，決定係数 $R_2=0.825$ と非常に適合度の高い数理モデルを構築することができた．「一対一しかけ評価指標」となる数理モデルは式(17)に示すように下式となる．

$$F_{ML} \cong \frac{1}{1+\exp(8.643-5.369X-3.723Y)}$$

以上より，全身運動を伴うボールゲームを想定した一対一において，攻者と守者の重心間相対位置および重心間相対速度という代表一質点から，一対一の成功および失敗が判定可能だという結論を得た．

本結果を基盤とし，5.3節で述べたように，前後左右の「ずれ」を算出することができれば，一対一における攻者と守者の仮想重心点（骨盤中心点など）一点を追跡するだけで，時々刻々のしかけ評価指標値を算出することが可能となり，ゲーム分析において「一対一」と「チームの質的変化（＝チームの流れ）」の関係性というミクロ-マクロ研究を行うことが可能になると考えられる．

参考文献

[1] Haken, H.: Principles of brain functioning: A synergetic approach to brain activity, behavior and cognition, *Springer-Verlag*: Berlin, (1996).

[2] Haken, H.: Synergetics: Introduction and advanced topics, *Springer-Verlag*: Berlin, (2004).

[3] Kelso, J. A. S.: Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior, *MIT Press*: Cambridge, (1995).

[4] Diedrich, F. J. and Warren, W. H.: Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition, Journal of Experimental Psychology, Vol. 21, pp. 183-202, (1995).

[5] Mateus, J.: In pursuit of an ecological and fractal approach to soccer coaching, *In T. Reilly, J. Cabri and D. Araujo (Eds.), Science and football V: The proceedings of the Fifth World Congress on Science and Football*, pp. 561-573, (2005).

[6] McGarry, T.: Soccer as a dynamical system: Some theoretical considerations. *In T. Reilly, J. Cabri and D. Araujo (Eds.), Science and football V: The proceedings of the Fifth World Congress on Science and Football*, pp. 551-560, (2005).

[7] 横山慶子, 山本裕二: ボールゲームの質的変化とその制御要因—6人制フィールドホッケーによる検証—, 体育学研究, Vol. 54, pp. 355-365, (2009).

[8] 瀧剛志, 長谷川純一: 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, Vol. 81, No. 8, pp. 1802-1811, (1998).

[9] Suzuki, T. and Nishijima, T.: Causal structure of the attacking skill in soccer games, *Research of physical education*, Vol. 47, No. 6, pp. 547-567, (2002).

[10] 廣津信義, ライトマイク: 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, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp. 196-197, (2004).

[11] Araujo, D., Davids, K., Bennett, S. J., Button, C. and Chapman, G.: Emergence of sport skills under constraints. *In A. M. Williams and N. J. Hodges (Eds.), Skill acquisition in sport: Research, theory and practice*, pp. 409-433, (2004).

[12] Hristovski, R., Davids, K., Araujo, D. and Button, C.: How boxers decide to punch a target: Emergent behavior in nonlinear dynamical movement system, *Journal of Sports Science and Medicine*, Vol. 5, pp. 60-73, (2006).

[13] 大橋二郎: サッカーのケーム分析—その手法と現場への応用—, バイオメカニクス研究, Vol. 3, pp. 119-124, (1999).

[14] 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, No. 11, pp. 23-33, (1992).

[15] Kahneman, D.: Attention and effort, Englewood Cliffs, NJ *Prentice-Hall*, (1973).

[16] 丹後俊郎, 高木晴良, 山岡和枝: ロジスティック回帰分析, 朝倉書店, (1994).

[17] Bishop, C. M.: Pattern Recognition and Machine Learning, *Springer*, (2006).

[18] 三井田惇郎, 須田宇宙, 城戸健一: 数値計算法（情報工学入門シリーズ), 森北出版, (2000).