

# サッカーの直接フリーキックにおける標的に向かって 軌道を蹴り分ける技術に関する研究

小西 徹<sup>1)</sup> 前田正登<sup>2)</sup>

## Techniques for kicking along various trajectories toward targets in direct free kicks in soccer

Toru Konishi<sup>1)</sup> and Masato Maeda<sup>2)</sup>

### Abstract

This study aimed to clarify techniques for kicking along various trajectories toward variously positioned targets in direct free kicks in soccer. Four experienced soccer players (career :  $12 \pm 0.8$  years) belonging to a university soccer club participated in this study. Participants were asked to kick a soccer ball to 4 targets at various combinations of vertical and lateral positions in the goal (3.5 m left of center and 3.5 m right of center; 1.2 m from the ground and 2.2 m from the ground) from behind a screen (height 1.8 m  $\times$  width 2.5 m) positioned 9.15 m in front of kicking points. Participants kicked from 3 positions located 20m from the goal (center of goal, 3.5 m left of center, 3.5 m right of center). The behavior of the kicked ball was recorded by 4 normal-speed video cameras and analyzed using three-dimensional direct linear transformation. Two high-speed video cameras were used to capture parameters related to ball rotation; one was placed facing the kicker and another was placed beside the kicker to capture the moment the ball was kicked. Results indicated that the lateral component of the Z-coordinates tended to approach the center of the goal and varied more widely than the vertical component. Additionally, lateral kicking direction was the most important parameter to kicking along various trajectories for all participants and combinations of target positions. The kicking direction for greatest reduction of error appeared to differ by strategies for kicking along various trajectories. Lastly, vertical kicking direction was an important parameter to kicking along various trajectories for some participants, but for other participants, initial velocities as well as kicking direction were important parameters.

Key words: free kick, accuracy, target, spin axis, trajectory  
フリーキック, 正確性, 標的, 回転軸, 軌道

### 1. 緒言

サッカーは、2013年度のJリーグディビジョン1における1試合あたりの平均得点が2.87点(日本プロサッカーリーグ, 2014)であったように、野球(9.0点: 鍋谷, 2007), あるいは7人制ラグビーや15人制ラグビー(それぞれ, 35.2点と44.6点: 古川ら, 2012)など、他の球技スポーツ種目に比べて少ない点数で勝敗が決まるスポーツである。また、1試合が90分という限られた時間の中で、シュートチャンスは数えられるほど少ないものである。甲斐ら(2015)は大学サッカー選手を対象とした研究で、枠内シュート数は勝ち

試合において8本、引き分けの試合に至っては5本であったと報告しており、その少ないチャンスで得点を決めることがサッカーの試合に勝つ上で重要な課題である。

サッカーにおける得点パターンの中でも、直接ゴールを狙うことができるフリーキックでは、相手選手はボールから9.15m離れなければならず、キッカーは相手のプレッシャーを受けることなくプレーをすることができ、キックの成否は得点に直結し、実際に、フリーキックによる得点が試合そのものを決めてしまうこともある(浅井と斉藤, 2005)。また、Dessing and Craig (2010)は、ゴールキーパーにとってスピンのか

1) 神戸大学大学院人間発達環境学研究科  
Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University

2) 神戸大学  
Kobe University

かったボールがどこに到達するかを予測することは非常に難しく、ボールがカーブするフリーキックは重要な得点チャンスになると述べている。

サッカーのキックに関する研究には、瀬尾ら (2005) のカーブ系のキックと無回転のキックについて飛翔軌跡をシミュレートした研究や、Bray and Kerwin (2003) のボールにかかる揚力や抗力などの流体力学の視点から数理モデルを作成した研究、Ishii et al. (2009) のボールの初速度や回転量に影響を与える因子を数値解析で明らかにした研究などがあるが、これらは被験者に射を行わせその正確性を検討したものではない。

キックの動作に関する研究には、下野ら (2007) の壁を越えて縦に落ちる変化をするボールを蹴る技術を3次元動作分析によって分析した研究や、浅井ら (2003) のインフロントカーブキックにおける蹴り足の運動に着目した研究、Ozaki and Aoki (2007) の2種類のカーブキックについて動作の側面と筋発揮の側面から比較検討した研究、Asai et al. (2002) のボールに回転をかける仕組みを蹴り足とボールの接触から明らかにした研究などが挙げられ、ボールがカーブするキックについて明らかにされてきた。しかし、これらの研究はキッカーの動作機序に着目しており、蹴り出されたボールが到達していく先の正確性の観点から検討がなされているものではない。

実際に射を行わせ、正確性について検討した研究には、後藤ら (2010) のインステップキックによるボールの着地点とターゲットの距離を指標としてキックの正確性を評価しようとした研究や、川本ら (2006) のインサイドキックにおける speed-accuracy trade-off のメカニズムを明らかにしようとした研究、水谷ら (2014) の異なる速度で蹴ったインステップキックの正確性に関する研究、Kaits et al. (2013) の異なる高さにある2つの標的に向かった射を行わせ、筋発揮や地面反力の観点から考察した研究、Majelan et al. (2011) の左右2か所に設置した標的に向かった射を行わせたものなどがある。しかし、これらの研究で用いられてきた実験の条件設定は、フリーキックを意識したものではない。また、直接フリーキックでよく使われる技術である、インフロントキックを対象にした研究に、清水と前田 (2012) の蹴り出されたボールの軌道や射の正確性に着目した研究があるが、設置した標的は1か所のみであり、実際のフリーキックにおける相手チームの壁の配置やゴールキーパーの位置に応じて蹴り分ける技術については

明らかにされていない。

本研究では、直接得点を上げることができるフリーキックに着目し、標的位置に応じて軌道を蹴り分ける技術について検討することを目的とした。

## II. 方法

### 1. 被験者

被験者は、関西学生リーグに加盟する大学サッカー部に所属する公式戦出場経験のある男子選手4名であった。なお、全ての被験者の利き脚(蹴り脚)は右脚であった。

### 2. 実験方法

実験は気象条件による影響を排除するために全て屋内で実施した。

実験は、試合におけるフリーキックの場面を想定して行った。フリーキックでは、前方9.15m先に選手が「壁」を設けることが一般的であり、本実験においてもキックポイントの前方9.15mの位置に、高さ180cm、幅250cmの「壁」を設置した。

実験条件としてボールのセット位置(以降、キックポイント)を変化させるため、ゴールの左右両ポストから20cm内側でクロスバーから20cmと120cmとなる位置、計4か所に標的を設置し、取り付けられた標的(直径6cmの発泡スチロールの表面に黄色のビニルテープを貼付したもの)を含めたゴール配置として3つのPatternを作成した。標的を含めたゴール位置を変化させ、キックポイントとゴールの位置を相対的に変化させることで、3つのPatternを設定した。なお標的を含めたゴールは、Pattern 1(以下、Left)では被験者から見て壁の右端がキックポイントと標的を結んだ直線から右側に50cmとなるように、Pattern 2(以下、Center)では被験者から見て壁の中心とゴールの中心が同じになるように、Pattern 3(以下、Right)では被

Table 1 被験者の身体特性

	Height (cm)	Weight (kg)	Age (yrs)	Career (yrs)
Subj.A	175	70	20	12
Subj.B	177	70	20	12
Subj.C	169	60	21	13
Subj.D	166	60	21	11
Mean	171.8	65.0	20.5	12.0
S.D.	5.1	5.8	0.6	0.8

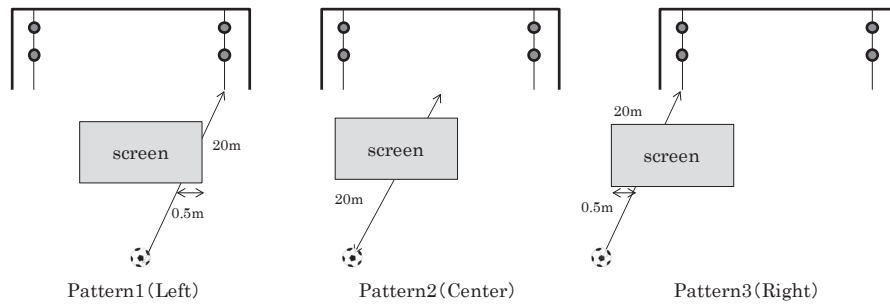


Fig. 1 ゴールおよび標的位置のパターン設定

験者から見て壁の左端がキックポイントと標的を結んだ直線から左側に50cmとなるように配置した。また、被験者からゴールまでの距離は20mとした。

実験構成をFig. 2に示す。実験は4か所の標的に向かって1か所につき10本ずつボールを蹴らせる計40本の試技を1セットとし、それをゴール位置3パターンで合計120本の試技を行わせた。狙う標的、ゴール位置のパターンはランダムに変化させ、被験者の疲労を考慮し、試技間には任意の休憩時間を与えた。被験者には、直接ゴールを狙うフリーキックを想定して、前方にある壁を越えてその先にある標的を狙って蹴るように指示した。なお、使用したボールは全日本大学サッカー連盟の公式球であるミカサ社製のMC5-WBLで、推奨内圧の0.800kgf/cm<sup>2</sup>に設定した。そしてボールの回転量および回転軸を算出するために、永見ら(2008)にならって、ボール表面には特徴点にするた

めの4つの数字「1」「2」「3」「4」を油性マジックでマーキングを施した。

各試技の撮影には、完全に同期した4台のビデオカメラ、および完全に同期した2台の高速度ビデオカメラを用いた。被験者後方に設置した2台のビデオカメラ(XC-009, SONY社)と被験者側方に設置した2台のビデオカメラ(DXC-200A, SONY社)で、ボールの軌道を撮影できるように画角を調節した。また、被験者側方に設置した1台の高速度ビデオカメラ(FASTCAM-NetC, Photoron社)はボールを蹴り出す瞬間を、被験者前方に設置した1台の高速度ビデオカメラ(FASTCAM-NetC, Photoron社)は、蹴り出されたボールの回転が撮影できるように画角を調節した。ボールの軌道を撮影する4台のビデオカメラのフレームレートは全て60コマ/秒、シャッタースピードは1/2000秒とした。ボールを蹴り出す瞬間とボールの

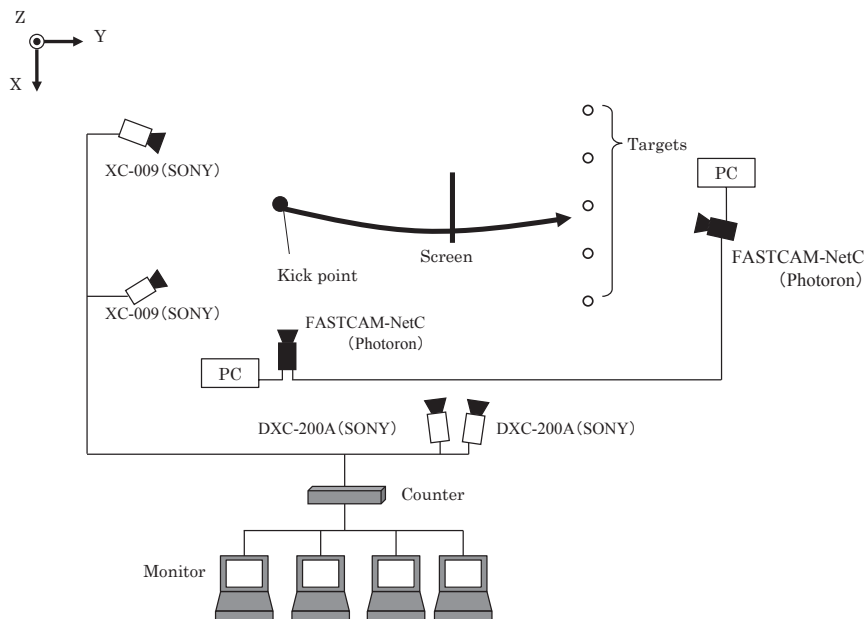


Fig. 2 実験構成図

回転を撮影する2台の高速度ビデオカメラのフレームレートはいずれも125コマ/秒, シャッタースピードは1/500秒とした. 軌道分析のキャリブレーション誤差は, 全ての実験において測定範囲に対して0.5%程度以下であり, 十分に小さい値であった.

### 3. 分析

#### 1) 分析方法

3次元動作分析ソフトウェア (Frame-DIAS III, ディケイエイチ社) を用いて分析を行った. なお, 壁を越えなかった試技のみを失敗試技とし, ゴール内に入ったか否かにかかわらず全ての試技を分析対象とした. ボールの軌道を撮影した映像について, 各試技の後方および側方から撮影した4台のビデオカメラ映像をコンピュータに取り込み, 蹴り出されたボールの中心をデジタル化し, ボールの3次元位置座標の時間変化を求めた. 各試技のボールの3次元位置座標の時間変化に最小二乗法による多項式近似をそれぞれ適用し, 得られた3つの多項式をボールの位置座標の時間変化とした.

Table 2に多項式近似に適用した次数と, 多項式近似によって得られた理論値と実測値との偏差平方和の例を示す. それぞれ, Subj.A (1試技目: Left), Subj.B (43試技目: Center), Subj.C (45試技目: Right), およびSubj.D (83試技目: Right) の試技である. Table 2より, X方向には3次, Y方向およびZ方向には2次以降で次数を上げて値が極端に小さくなることが認められなかった. したがって本研究では, X方向においては3次式, Y方向およびZ方向においては2次式を適用するものとした.

ボールの回転を撮影した映像について, Jinji and Sakurai (2006) や前田と白井 (2008) の方法にならない,

ボールと足が離れた瞬間からボールの円周上の5点およびボール上にマーキングした特徴点をデジタル化し, ボールの回転軸および回転量を算出した.

#### 2) 分析項目

本研究では, 以下の6項目を分析項目として算出した.

##### a. ボールの到達座標 [m]

ボールの3次元位置座標の時間変化を基に, ボールのY座標が20mとなった時点におけるX座標とZ座標を到達座標とした.

##### b. X方向, Z方向の誤差 [m]

a. で算出したボールの到達座標と, 狙った標的の中心までの距離をX方向とZ方向に分けて算出し, X方向の誤差, Z方向の誤差とした.

##### c. ボールの初速度 [m/s]

ボールの3次元位置座標の時間変化から, ボール静止位置 ( $t=0$ ) とインパクト0.1秒後の変位を求め, その値を0.1で除したものを初速度とした.

##### d. 飛び出し角度 [deg.]

ボールの3次元位置座標から, インパクト時のボール中心位置とインパクトの0.1秒後のボール中心位置とのなす角度を求め, 飛び出し角度の仰角 $\phi$ を算出した. また, ボールのセットポイントから標的に向かう

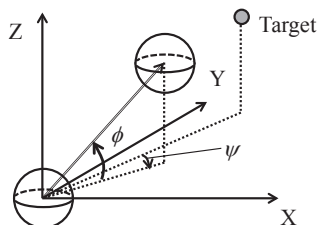


Fig. 3 ボールの飛び出し角度 $\phi$ および $\psi$ の定義

Table 2 算出された値と実測値の偏差平方和

(単位: cm)

Order	Subj.A 1st attempt (Left)	Subj.B 43rd attempt (Center)	Subj.C 45th attempt (Right)	Subj.D 83rd attempt (Right)	
X-axis	2nd	1.89	1.69	3.23	1.21
	3rd	1.22	0.71	1.06	0.87
	4th	1.17	0.70	0.95	0.83
Y-axis	2nd	5.12	4.23	3.72	4.47
	3rd	5.42	4.34	3.88	4.50
	4th	5.75	4.55	3.88	4.48
Z-axis	2nd	0.77	0.60	0.90	0.83
	3rd	0.77	0.61	0.88	0.69
	4th	0.75	0.61	0.87	0.67

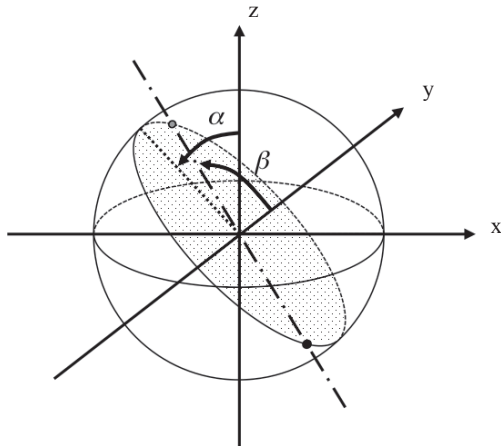


Fig. 4 回転軸角度  $\alpha$  および  $\beta$  の定義

ベクトルとボールの初速度ベクトルがなす水平面における角度を方位角  $\psi$  として算出した.

e. ボールの落差  $\Delta Z$  [m]

蹴り出されたボールが最高点に達した時点のZ座標とゴールを通過した時点のZ座標の差とした.

f. 回転軸角度 [deg.], 回転量 [rps]

Jinji and Sakurai (2006) や前田と白井 (2008) の方法を参考に, Fig. 2における前方から撮影した1台の高速ビデオカメラの映像より, ボールインパクト直後の画像をもとに算出した. 標的方向をY軸, 鉛直方向をZ軸, Y軸およびZ軸に直交する軸をX軸とし, ボールの中心を原点とする右手系の移動座標系を定義した.

1コマごとの画像上でのボール表面のポイントマーカーの位置変化から, ボール回転量および回転軸角度  $\alpha$ ,  $\beta$  を算出した. 回転軸角度  $\alpha$  はXZ平面において回転軸およびY軸を含む平面がZ軸より反時計回りに傾いている角度を, 回転軸角度  $\beta$  は回転軸およびY軸を含む平面において, 回転軸がY軸から反時計回りに傾いている角度を示すものである. 回転量は, 1秒あたり反時計回りに回転する量を示すものである.

### 3) 統計処理

各パターンにおける各標的位置において, 各種パラメータの平均値を算出し, それらのパラメータと到達座標から標的中心までの距離とのピアソンの積率相関係数を算出し, 無相関検定によって有意差を検定した.

上下方向の標準偏差と左右方向の標準偏差の平均値の差の検定には, 対応のある2標本のt検定を用いた.  $\Delta Z$ , 回転軸角度及び回転量の平均値の差の検定には標的位置の左右と上下の2つを変量とした二元配

置分散分析を行い, scheffeの方法で多重比較検定を行い, 各群間の有意差を確認した.

本研究における統計処理の有意水準は5%未満とした.

## III. 結果

### 1. 到達座標の分布

Fig. 5a~5cに各被験者の到達座標の平均値を示す. 左右方向について, 多くの条件(48条件中35条件)で標的位置よりもゴールの中央寄りに到達していること

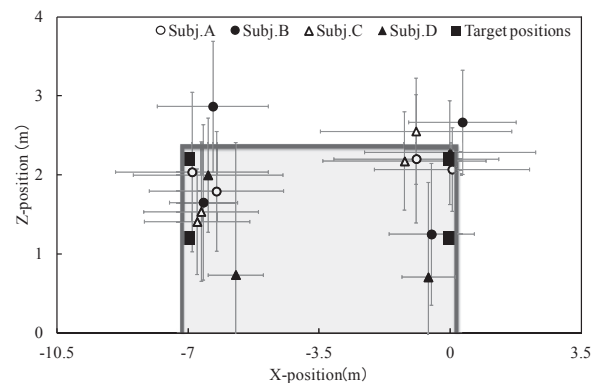


Fig. 5a Leftにおける到達座標

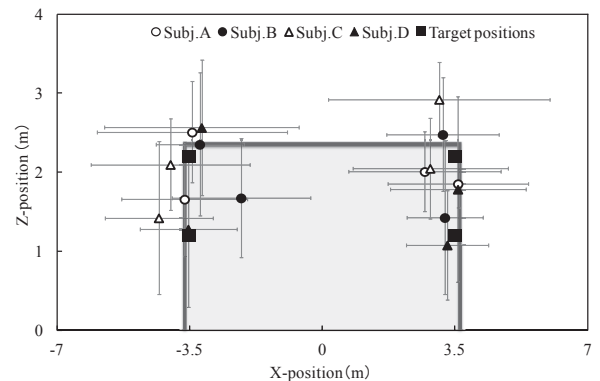


Fig. 5b Centerにおける到達座標

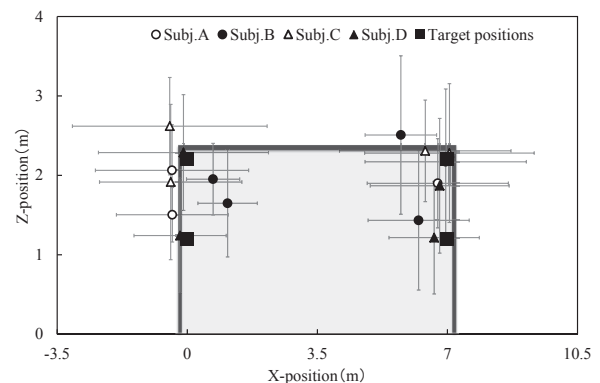


Fig. 5c Rightにおける到達座標



Table 3 各被験者の到達座標と標準偏差の例

(単位: m)

		Subj.A (Left)		Subj.B (Center)		Subj.C (Right)		Subj.D (Right)	
		left	right	left	right	left	right	left	right
High	X-position	-6.90±1.21	-0.91±1.04	-3.23±1.16	3.18±1.48	-0.47±0.83	6.40±0.77	-0.10±1.12	6.79±1.01
	Z-position	2.84±0.83	2.21±0.81	2.35±0.90	2.48±0.72	2.61±0.61	2.31±0.64	2.29±0.73	1.87±0.85
Low	X-position	-6.25±0.84	0.04±1.08	-2.14±1.83	3.23±1.00	-0.45±1.35	7.05±1.18	-0.19±0.94	6.64±0.82
	Z-position	1.79±0.76	2.07±0.52	1.67±0.76	1.43±0.97	1.92±0.99	2.28±0.87	1.24±0.73	1.22±0.71

が分かる。Table 3に各被験者の蹴り出されたボールの到達座標の平均値および標準偏差の例を示す。表において、上下方向の標準偏差と左右方向の標準偏差を比べると、すべての条件で左右方向の標準偏差の方が大きいことが分かる。また、全被験者の各条件における上下方向の標準偏差は左右方向の標準偏差よりも有意に小さかった（上下方向の標準偏差の平均値は0.77m, 左右方向の標準偏差の平均値は1.03m）。

2. 左右方向の正確性

Table 4に飛び出し角度ψとX方向の誤差の関係を示す。飛び出し角度ψとX方向の誤差の間にはほぼ全ての条件において有意な相関関係が認められた。

飛び出し角度ψとX方向の誤差について、有意な相関関係が認められた代表例をFig. 6に示す。図に示されるように、ボールが標的の右側に到達した場合はX方向の誤差は正の値、標的の左側に到達した場合はX方向の誤差は負の値となり、X方向の誤差が0となる時が左右方向の誤差もゼロ、つまり、ボールの到達位置と標的の位置が左右方向については一致することを意味する。本研究では、このX方向の誤差が0となる飛び出し角度ψを飛び出し角度ψ<sub>min</sub>とし、有意な相関関係が認められた条件について算出した。各条件にお

Table 4 飛び出し角度ψとX方向の誤差の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	high	0.96**	0.98**	0.96**	0.91**	0.93**	0.85**
	low	0.85**	0.90**	0.95**	0.92**	0.96**	0.83**
Subj.B	high	0.95**	0.99**	0.97**	0.72*	0.75*	0.79**
	low	0.92**	0.96**	0.97**	0.85**	0.53	0.83**
Subj.C	high	0.76*	0.94**	0.36	0.76*	0.91**	0.96**
	low	0.96**	0.98**	0.92**	0.95**	0.99**	0.98**
Subj.D	high	0.96**	0.95**	0.97**	0.95**	0.97**	0.98**
	low	0.93**	0.58	0.90**	0.87**	0.95**	0.97**

\*: p<0.05, \*\*: p<0.01

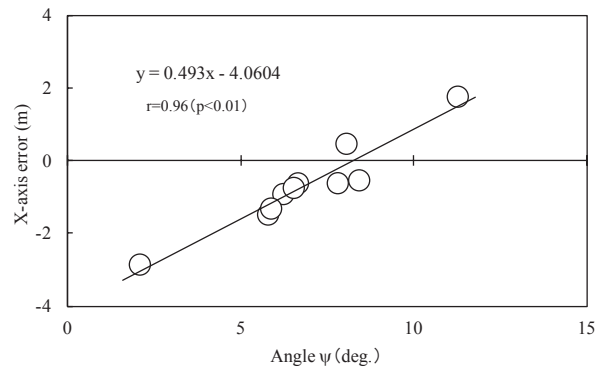


Fig. 6 飛び出し角度ψとX方向の誤差の関係 (Subj.A: Left/left-high)

ける飛び出し角度ψ<sub>min</sub>をTable 5に示す。

被験者4名の初速度と飛び出し角度ψ<sub>min</sub>の関係をFig. 7に示す。Fig. 7より、Subj.A (r = -0.58, p < 0.05), Subj.B (r = -0.60, p < 0.05) およびSubj.C (r = -0.68, p < 0.05) では初速度と飛び出し角度ψ<sub>min</sub>の間に有意な相関関係が認められたが、Subj.Dでは有意な相関関係は認められなかった。

Leftの場合を例に、被験者4名のXY平面におけるボールの飛翔軌道の例をFig. 8に示す。ゴールの右側を狙った試技は、ゴールの左側を狙った試技に比べてボールの飛翔軌道に違いが見られた。

Table 5 左右方向の誤差が最小となる飛び出し角度ψ<sub>min</sub> (単位: deg.)

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	8.1	7.6	8.3	9.5	8.2	8.9
	Low	8.7	7.8	8.7	9.7	8.4	8.2
Subj.B	High	8.2	6.8	7.2	5.2	8.2	4.7
	Low	8.2	7.1	7.1	6.3	-	5.9
Subj.C	High	5.7	6.5	-	9.9	7.8	9.1
	Low	8.8	9.1	8.1	9.0	8.9	9.8
Subj.D	High	7.1	7.4	9.6	8.2	7.9	8.1
	Low	7.8	-	9.6	9.2	7.9	8.3

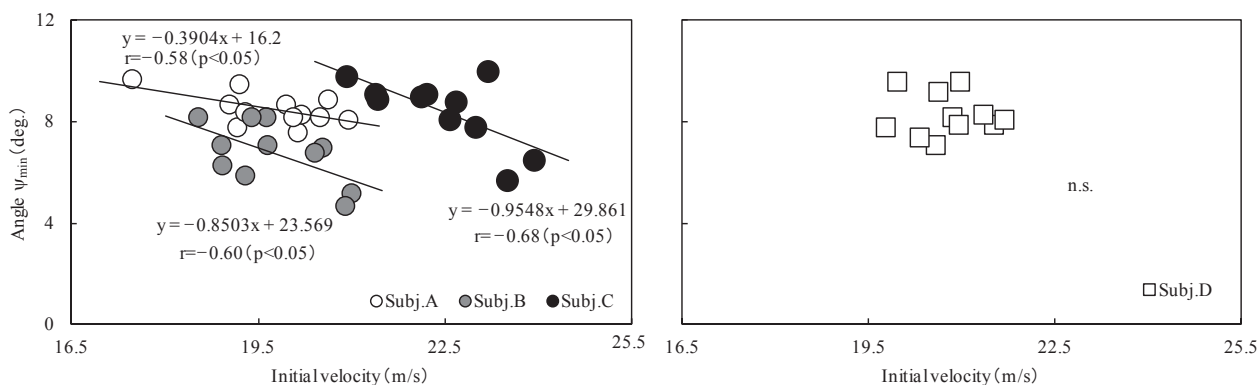


Fig. 7 初速度と飛び出し角度 $\phi_{min}$ の関係

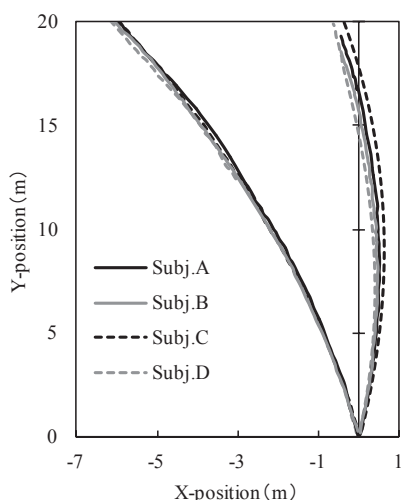


Fig. 8 XY平面における各被験者の蹴り出されたボールの軌道 (Left)

### 3. 上下方向の正確性

本実験において、試技を繰り返す中で距離感を掴むことができ、その結果上下方向の誤差が小さくなっていくことが考えられる。そこで、試技回数と上下方向の誤差の関係を調べたが、有意な相関関係は認められなかった。

Table 6に飛び出し角度 $\phi$ とZ方向の誤差の関係を示す。Subj.Aでは、Right/left-high ( $r = 0.79, p < 0.01$ )とCenter/left-low ( $r = 0.67, p < 0.05$ )の2つの条件で有意な相関関係が認められた。一方、Subj.Dでは、Left/left-highとCenter/left-lowおよびRight/left-lowを除く9つの条件で有意な相関関係 ( $r = 0.68, p < 0.05 \sim r = 0.93, p < 0.01$ )が認められた。

Table 7に初速度と飛び出し角度 $\phi$ の関係を示す。Subj.Aでは、Left/left-highとLeft/right-lowおよびRight/right-lowを除く9つの条件で有意な相関関係 ( $r = -0.66, p < 0.05 \sim r = -0.92, p < 0.01$ )が認められた。一方で、Subj.Dでは、Left/left-high ( $r = -0.81, p < 0.01$ )

Table 6 飛び出し角度 $\phi$ とZ方向の誤差の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	0.54	0.24	0.45	0.17	0.79**	0.65
	Low	0.35	0.29	0.67*	0.41	0.25	0.20
Subj.B	High	0.69*	0.65*	0.80**	-0.49	0.03	-0.02
	Low	0.22	0.08	0.01	0.58	-0.65*	0.48
Subj.C	High	0.49	0.84**	0.87**	0.83**	0.22	0.33
	Low	0.11	0.31	0.81**	0.68*	0.59	0.87**
Subj.D	High	0.47	0.79**	0.93**	0.74**	0.73**	0.92**
	Low	0.91**	0.75**	0.37	0.69*	0.61	0.68*

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

Table 7 初速度と飛び出し角度 $\phi$ の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	-0.59	-0.73*	-0.87**	-0.90**	-0.91**	-0.73*
	Low	-0.66*	-0.61	-0.88**	-0.92**	-0.76**	-0.21
Subj.B	High	-0.53	-0.48	-0.24	-0.55	-0.76**	-0.82**
	Low	-0.68*	-0.73*	-0.64*	-0.55	-0.89**	-0.39
Subj.C	High	-0.57	-0.23	-0.47	-0.88**	-0.80**	-0.60
	Low	-0.56	-0.77**	-0.29	-0.93**	-0.81**	-0.76**
Subj.D	High	-0.81**	-0.51	-0.61	-0.58	-0.48	-0.63
	Low	-0.78**	0.04	-0.45	-0.23	-0.75*	-0.17

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

とLeft/left-low ( $r = -0.78, p < 0.01$ ) およびRight/left-low ( $r = -0.75, p < 0.05$ )の3つ条件で有意な相関関係が認められた。

Table 8に各被験者の $\Delta Z$ を示す。上下方向における差をみると、Subj.Aは4条件間で、Subj.B、Subj.Cは5条件間で有意な差が認められた。一方で、Subj.Dは1条件間で有意な差が認められた。有意差が認められた条件は全て高い位置の標的に狙った時の $\Delta Z$ が、低

Table 8 各試技の落差 $\Delta Z$

(単位:m.)

		Left		Center		Right		Significant difference (Show only High vs Low)
		left	right	left	right	left	right	
Subj.A	High	1.23±0.6	1.01±0.5	0.82±0.3	0.99±0.3	0.86±0.2	0.91±0.5	Center/left-low > Center/left-high** Center/right-low > Center/right-high* Left/left-low > Left/left-high** Left/right-low > Left/right-high*
	Low	1.29±0.5	1.10±0.3	1.27±0.4	1.35±0.3	1.35±0.2	1.27±0.4	
Subj.B	High	0.53±0.3	0.48±0.2	0.73±0.4	0.67±0.5	1.06±0.3	0.84±0.6	Left/left-low > Left/left-high** Left/right-low > Left/right-high** Center/left-low > Center/left-high* Center/right-low > Center/right-high** Right/right-low > Right/right-high**
	Low	1.32±0.7	1.52±0.6	1.27±0.4	1.41±0.6	1.33±0.5	1.53±0.5	
Subj.C	High	1.12±0.4	0.39±0.2	0.65±0.2	0.35±0.1	0.50±0.3	0.72±0.3	Left/right-low > Left/right-high* Center/left-low > Center/left-high** Center/right-low > Center/right-high** Right/left-low > Right/left-high** Right/right-low > Right/right-high*
	Low	1.20±0.7	0.82±0.4	1.16±0.5	0.80±0.3	1.05±0.4	1.05±0.3	
Subj.D	High	1.29±0.4	1.04±0.2	1.06±0.2	1.28±0.7	0.95±0.2	1.13±0.3	Right/right-low > Right/right-high*
	Low	1.75±0.7	1.42±0.5	1.16±0.5	1.51±0.4	1.17±0.3	1.45±0.4	

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

い位置の標的を狙った時の $\Delta Z$ に比べて小さかった。

Fig. 9にSubj.A, Subj.DのYZ平面におけるボールの飛翔軌道の例を示す. Subj.Aについて, 高い位置を狙うときは低い位置を狙うときよりも小さい飛び出し角度 $\phi$ で蹴り出していることがわかる. この時の初速度は22.5m/s, 飛び出し角度 $\phi$ は16.3deg.であった. しかし, 低い位置を狙った試技は高い位置を狙ったときよりも早く落下が始まり, ゴール到達時のZ座標は高い位置を狙ったときよりも小さくなっている. この時の初速度は18.1m/s, 飛び出し角度 $\phi$ は20.9deg.であった. 一方で, Subj.Dは高い位置を狙うときは低い位置を狙うときよりも大きい飛び出し角度 $\phi$ で蹴り出しており, Subj.Aのように途中でボールのZ座標が逆転するような軌道は見られなかった(高い位置を狙った時の初速度は23.2m/s, 飛び出し角度 $\phi$ は20.6deg., 低い位置を狙った時の初速度は22.0m/s, 飛び出し角度 $\phi$ は17.7deg.).

4. ボールの回転と正確性

回転軸角度 $\alpha$ , および回転軸角度 $\beta$ について, 各被験者の値をそれぞれTable 9aおよびTable 9bに示す. 回転軸角度 $\alpha$ では, Subj.AについてはCenter/right-highとCenter/right-lowの間で, Subj.BについてはLeft/left-lowとLeft/right-lowの間で, Subj.CのCenter/right-highとRight/left-highの間, およびRight/left-highとRight/left-lowの間で, Subj.DのLeft/right-highとLeft/right-lowの間, およびCenter/left-highとCenter/left-lowの間でそれぞれ有意差が認められた(いずれも $p < 0.05$ ). 回転軸角度 $\beta$ では, Subj.BについてはLeft/left-highとRight/right-highの間で( $p < 0.01$ ), Subj.CについてはCenter/right-highとRight/left-highの間, およびRight/right-highとRight/right-lowの間で(いずれも $p < 0.05$ )それぞれ有意差が認められた. 回転軸角度の範囲は最大で回転軸角度 $\alpha$ がSubj.B(-27.8~-42.3 deg.)の14.5 deg., 回転軸角度 $\beta$ がSubj.

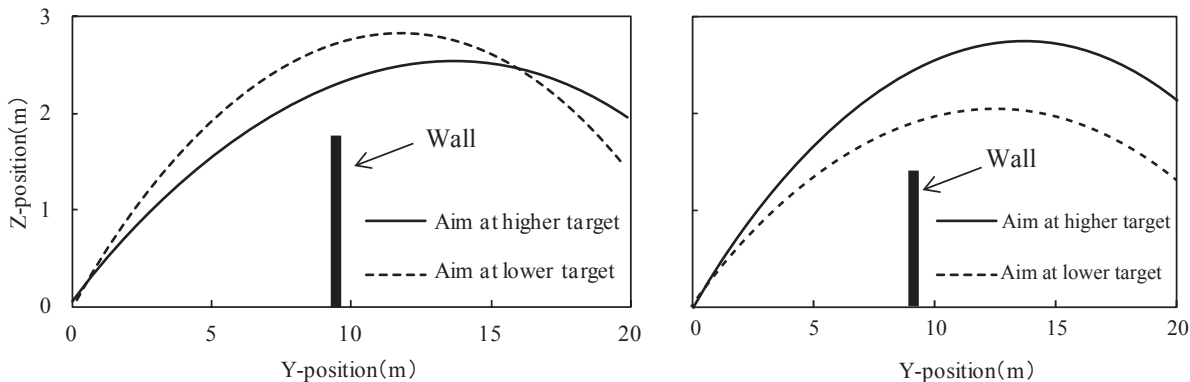


Fig. 9 YZ平面における蹴り出されたボールの軌道の例 (左: Subj.A, 右: Subj.D)



Table 9a 各試技の回転軸角度  $\alpha$

(単位: deg.)

		Left		Center		Right		Significant difference
		left	right	left	right	left	right	
Subj.A	High	-25.7±6.3	-25.4±7.1	-30.8± 6.8	-23.0± 5.3	-27.4± 7.3	-23.6± 7.8	Center/right-high > Center/right-low*
	Low	-26.3±3.5	-29.9±5.8	-30.2± 6.7	-30.6± 2.8	-28.8± 7.2	-25.7± 4.2	
Subj.B	High	-36.3±5.1	-33.0±8.2	-36.7± 5.2	-34.5±10.6	-32.9± 7.2	-42.3±14.5	Left/right-low > Left/left-low*
	Low	-41.1±6.3	-27.8±7.5	-41.2±18.1	-34.3± 7.1	-35.1± 5.7	-38.9±14.0	
Subj.C	High	-20.0±6.7	-22.9±7.1	-22.6± 6.5	-19.2± 3.3	-31.4±10.7	-23.2± 3.8	Center/right-high > Right/left-high*
	Low	-20.7±5.7	-24.8±5.1	-23.7±12.1	-23.8± 4.2	-23.1± 4.1	-23.3± 5.7	Right/left-low > Right/left-high*
Subj.D	High	-29.2±8.3	-25.1±8.6	-33.6± 9.3	-24.6± 0.8	-26.6± 3.2	-27.6± 6.6	Left/right-low > Left/right-high*
	Low	-33.0±9.0	-33.8±9.8	-24.9± 6.4	-26.0± 8.3	-25.2± 7.1	-24.8± 2.1	Center/left-low > Center/left-high*

\*:  $p < 0.05$

Table 9b 各試技の回転軸角度  $\beta$

(単位: deg.)

		Left		Center		Right		Significant difference
		left	right	left	right	left	right	
Subj.A	High	76.7± 8.5	78.8±11.3	81.8± 9.6	76.9±18.3	78.3± 7.5	63.3± 9.4	n.s.
	Low	82.5±12.6	80.7±15.0	82.9± 9.6	71.6±12.2	74.1±20.6	69.4±17.7	
Subj.B	High	86.1± 7.9	77.5± 9.3	83.1± 8.9	83.8± 6.9	81.3± 7.7	80.1±12.8	Left/left-high > Right/right-high**
	Low	85.1± 8.5	70.3± 8.2	87.9± 5.2	82.3±13.6	83.6± 4.7	79.3± 9.7	
Subj.C	High	64.3±14.0	64.7±10.3	75.2± 1.5	64.7± 6.6	76.0± 8.9	68.7±14.0	Left/left-high > Center/right-high*
	Low	63.7±12.5	61.7± 6.8	76.2±19.0	64.3± 4.9	71.6±14.9	57.3±10.8	Right/right-high > Right/right-low*
Subj.D	High	69.3± 9.3	62.8±18.8	68.3± 5.8	52.5±10.5	66.8±12.1	57.6± 8.7	n.s.
	Low	71.8±15.5	54.7±13.4	77.5±17.7	65.0±23.3	73.2±19.0	56.2±16.4	

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

D (52.5~77.5 deg.) の25.0 deg.であった。

回転量 $\omega$ について各被験者の値をTable 10に示す。回転量 $\omega$ では、Subj.BについてはLeft/left-lowとRight/right-lowの間、およびRight/right-highとRight/right-lowの間で(いずれも $p < 0.05$ )、Subj.CについてはLeft/left-highとLeft/left-lowの間で( $p < 0.01$ )それぞれ有意差が認められた。被験者内での回転量の範囲

は、Subj.B (6.8rps : Right/right-low~9.3rps : Left/left-low) の2.5 rpsが最も大きかった。

Table 11aに回転軸角度 $\alpha$ とZ方向の誤差との相関係数を、Table 11bに回転軸角度 $\beta$ とZ方向の誤差との相関係数を、Table 12に回転量 $\omega$ とZ方向の誤差の関係をそれぞれ示す。Table 11aおよびTable 11bより、回転軸角度 $\alpha$ とZ方向の誤差との間でSubj.Aは4条件、

Table 10 各試技の回転量 $\omega$

(単位: rps)

		Left		Center		Right		Significant difference
		left	right	left	right	left	right	
Subj.A	High	8.4±0.9	8.2±1.1	9.1±1.5	9.2±1.5	8.3±1.2	8.5±1.5	n.s.
	Low	8.6±1.7	8.3±1.1	8.3±1.3	9.0±1.9	8.2±1.2	8.8±1.0	
Subj.B	High	8.9±1.1	7.6±0.9	7.0±1.5	8.4±1.4	7.6±1.2	8.5±2.6	Left/left-low > Right/right-low*
	Low	9.3±1.2	7.8±1.3	8.2±2.0	7.3±0.7	8.5±1.6	6.8±0.9	Right/left-low > Right/right-low*
Subj.C	High	8.6±1.2	8.5±1.2	9.2±1.4	9.3±1.0	8.6±0.8	8.1±1.0	Left/left-low > Left/left-high**
	Low	10.2±1.1	8.1±0.9	9.8±0.5	9.9±1.4	9.3±0.6	8.7±1.0	
Subj.D	High	6.8±1.2	7.8±1.3	6.3±0.7	7.3±1.1	7.5±1.1	7.5±1.1	n.s.
	Low	7.5±1.8	7.4±1.1	6.8±0.8	7.4±1.1	7.8±1.1	7.3±1.0	

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

Table 11a 回転軸角度  $\alpha$  と Z 方向の誤差の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	-0.79**	-0.13	-0.70*	-0.69*	0.14	0.64*
	Low	-0.21	0.13	0.43	-0.05	0.34	0.05
Subj.B	High	-0.60	-0.70*	0.16	0.59	-0.39	-0.53
	Low	0.07	-0.36	-0.08	0.06	0.48	0.66*
Subj.C	High	0.13	-0.21	0.44	-0.84**	0.19	0.38
	Low	0.74	-0.20	-0.19	0.52	0.61	0.56
Subj.D	High	-0.75*	0.02	0.58	0.60	0.51	0.26
	Low	0.18	0.77**	-0.15	0.19	-0.16	0.08

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ Table 11b 回転軸角度  $\beta$  と Z 方向の誤差の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	0.34	-0.32	0.11	-0.11	0.44	-0.65*
	Low	0.24	-0.20	0.23	-0.48	0.47	-0.14
Subj.B	High	0.46	0.26	0.06	-0.16	-0.60	0.58
	Low	0.25	-0.74*	-0.15	0.16	0.36	-0.41
Subj.C	High	-0.16	-0.26	-0.73*	0.20	0.21	-0.34
	Low	0.59	-0.04	-0.48	-0.64*	-0.20	-0.62
Subj.D	High	0.54	0.22	-0.53	-0.54	-0.34	-0.03
	Low	-0.53	-0.74*	-0.44	-0.44	0.26	0.54

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ Table 12 回転量  $\omega$  と Z 方向の誤差の相関係数

		Left		Center		Right	
		left	right	left	right	left	right
Subj.A	High	-0.49	-0.26	0.41	-0.21	0.10	0.10
	Low	0.48	-0.03	0.32	-0.42	-0.33	-0.33
Subj.B	High	0.19	-0.02	0.14	-0.12	-0.34	0.10
	Low	-0.29	-0.51	0.11	-0.48	-0.21	0.34
Subj.C	High	-0.31	-0.03	0.48	0.50	-0.53	-0.82**
	Low	-0.41	-0.01	0.74*	-0.06	0.18	0.34
Subj.D	High	-0.49	-0.26	0.41	-0.21	0.10	-0.61
	Low	0.48	-0.03	0.32	-0.42	-0.33	-0.04

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ 

Subj.B, C, Dでは2条件ずつ, 合計10条件で有意な相関が認められた。回転軸角度  $\beta$  と Z 方向の誤差との間でSubj.A, Subj.B, およびSubj.Dは1条件(それぞれRight/right-high, Left/right-low, およびLeft/right-low), Subj.Cでは2条件(Center/left-highおよびCenter/right-low)の合計5条件で有意な相関関係が認められた。これらの有意な相関関係が認められた条件は被験者によって異なっていた。またTable 12より, 回転量  $\omega$  と Z 方向の誤差の間には, 有意な相関関係はSubj.CのCenter/left-low ( $r = 0.74$ ,  $p < 0.05$ ) とRight/right-high ( $r = -0.82$ ,  $p < 0.01$ ) の2条件を除いて認められなかった。

#### IV. 考 察

##### 1. 蹴り出されたボールの到達位置

Fig. 5a~5cの到達座標の例をみると, 全48条件中35条件でボールが標的よりもゴールの内側に到達しており, 到達位置がゴールの中央寄りに分布している

傾向がみられた。また, Table 3でみられたように, 到達座標の標準偏差は上下方向に比べて左右方向の方が大きい傾向であった。水谷ら(2014)はサッカーのインステップキックで11m先のゴール中央を狙わせる課題の実験を行い, 的と到達座標の誤差を上下方向と左右方向に分けて算出して, そのばらつきに大きな差は無いことを明らかにしており, 本研究とは異なる結果を報告している。この先行研究では2m×3mの枠内に設置した的に向かって蹴らせているのに対し, 本研究では実際のゴールとはほぼ同じ枠内(2.4m×7.4m)に標的を設置し, 実際の試合での直接フリーキックを想定して射を行わせている。サッカーのゴールは上下方向に比べて左右方向に広いうえ, 本研究の設定では, 被験者は前方の壁を越えて射を行う必要があり, 上下方向に蹴り分けることは左右方向に蹴り分ける以上に困難であったものと推察される。壁に当たった試技を分析対象外としているため, このような結果となったとも考えられるが, 本研究では直接フリーキックは壁を超えることを前提としているため, 本研究ではこの結果が妥当であると考え。したがって, 被験者は左右方向の正確性よりも上下方向の正確性を重視して射を行っていた可能性が示唆される。

左右方向に蹴り分ける際の正確性について, Majelan et al. (2011)は狙った標的が左右のどちら側にある場合でも, キックの正確性に有意な差は見られなかったと述べている。本研究においても左右の標的で正確性に大きな差は認められず同様の結果が得られており, 本研究の実験に類似した設定の直接フリーキックにおいても, 標的位置が左右方向に異なることによって, 正確性に大きな違いがみられることはないものと考えられる。

## 2. ボールの飛び出し角度と左右方向の蹴り分けの関係

Table 4の飛び出し角度 $\psi$ とX方向の誤差の相関関係をみると、飛び出し角度 $\psi$ と左右方向の誤差の間には、被験者4名のほとんどの条件において有意な正の相関関係が認められた。また、それらの相関係数は大きく( $r=0.99\sim 0.72$ )強い正の相関関係にあることから、左右方向の正確性は飛び出し角度 $\psi$ に大きく依存していると考えられる。

清水と前田(2012)は、飛び出し角度 $\psi_{\min}$ は被験者によって異なり、その値は標的までの距離によって変化したと述べている。Table 5の各被験者の飛び出し角度 $\psi_{\min}$ をみると、本研究においても飛び出し角度 $\psi_{\min}$ は被験者によって異なっていた。また、本研究はゴールの左右方向の位置、および標的の上下、左右方向の位置のみを変化させているため、各標的までの距離を大きく変える設定にはなっていないにもかかわらず、標的の位置やゴールの位置の変化に伴って飛び出し角度 $\psi_{\min}$ も被験者内で異なっていた。つまり、飛び出し角度 $\psi_{\min}$ は標的までの距離が同程度であっても、ゴールの位置や標的位置が上下、左右方向でどの位置にあるかによっても変わり得ることが明らかになった。Fig. 8のXY平面上のボールの軌道の例をみると、同じ位置に向かった射を行っていても被験者ごとに異なる軌道を描いていることがわかる。

飛び出し角度 $\psi_{\min}$ が被験者や設定条件によって異なることについて、Fig. 7で示されるように、初速度と飛び出し角度 $\psi_{\min}$ の間に有意な相関関係が認められた被験者(Subj.A, Subj.BおよびSubj.C)と、相関関係が認められなかった被験者(Subj.D)に分けられた。Subj.A, Subj.BおよびSubj.Cは、標的位置やゴール位置の変化に応じて初速度を変化させ、飛び出し角度 $\psi_{\min}$ も変化させている、つまり、設定状況に応じて射の方策を変化させているものと考えられる。一方、Subj.Dは、各標的位置で初速度に応じて飛び出し角度 $\psi_{\min}$ を変化させるのではなく、設定状況によらず常に同じ射の方策を用いて射を行っていたものと考えられる。

## 3. 上下方向の蹴り分けに影響を及ぼすパラメータ

Table 6の飛び出し角度 $\phi$ とZ方向の誤差の相関関係をみると、飛び出し角度 $\phi$ とZ方向の誤差の間には有意な相関関係が認められる条件があった。しかしそれらの関係は個人差が大きく、例えば、Subj.Aでは2つの条件で有意な相関関係が認められたのに対し、Subj.Dでは12条件のうちの9つの条件において有意

な相関関係が認められた。また、Table 7の飛び出し角度 $\phi$ と初速度の相関関係をみると、Subj.Aでは9つの条件において有意な相関関係が認められたのに対し、Subj.Dでは3つの条件で有意な相関関係が認められた。

各被験者の $\Delta Z$ の上下間における差をみるとSubj.Aは4条件間、Subj.B, Subj.Cは5条件間で有意な差が認められたのに対し、Subj.Dは1条件間で有意な差が認められた。つまり、Subj.A, Subj.B, Subj.Cは蹴り出したボールの落差を変化させて的射を行っているのに対し、Subj.Dは3名の被験者に比べてボールの落差を変化させずに的射を行っていた可能性が示唆される。

そこで具体的な飛翔軌道として、Fig.9のSubj.AおよびSubj.DのYZ平面におけるボールの飛翔軌道の例をもとに検討する。Subj.Aは上段の標的を狙うとき、大きな初速度(22.5m/s)と小さな飛び出し角度 $\phi$ (16.3deg.)で、落差を小さくして射を行っているのに対して、下段の標的を狙うときは、上段の標的を狙うときに比べて小さな初速度(18.1m/s)と大きな飛び出し角度 $\phi$ (20.9deg.)で蹴り出すことで、落差を大きくして射を行っていた。下段の標的を狙う際、落差を大きくすることで壁に当てずに射を行えるよう蹴り出した可能性がある。一方、Subj.Dは上段の標的を狙うときと、下段の標的を狙うときで落差の幅を変えずに射を行っていた。上段の標的を狙う時には初速度23.2m/s、飛び出し角度 $\phi$ 20.6deg.で蹴り出しているのに対し、下段の標的を狙う時には上段を狙う時に比べて小さな初速度(22.0m/s)と小さな飛び出し角度 $\phi$ (17.7deg.)で蹴り出しており、標的を狙って高低に蹴り分け方は、Subj.AとSubj.Dで異なっていたと考えられる。

射の方策の違いについて、Nasu et al. (2014)はダーツ上級者と初級者における投げの正確性に関する研究で、上級者の間でも正確にスローを行うための方策はリリースするタイミングをある程度許容しそれを補うような運動方略と、リリースするタイミングを徹底して小さくする方略の2つに分けられたとしている。本研究の被験者は全てリーグ戦に出場しており、競技レベルに大きな差は無く、両被験者とも熟練者とみなすことができる。したがって、サッカーの直接フリーキックにおいてもダーツと同様に、Subj.Aは壁に当たらないことを優先する方略を、Subj.Dは壁に当たることを恐れずに射を行う方策をとっていた可能性があり、熟練した選手それぞれで射の方策が異なる可能性

が示唆される。

#### 4. ボールの回転が正確性に及ぼす影響

本研究ではボールの回転に関して、上下方向の誤差との間に有意な相関が認められる条件がいくつかみられたが、それらの条件は被験者によって異なり、その数も初速度や飛び出し角度と正確性との相関関係ほど多くの箇所で認められることはなかった。

永見ら (2008) は、1名のプロ野球選手を対象とした変化球各種のボール回転軸角度について、各種で回転軸角度が大きく異なることを明らかにしており、特に、ストレートとスライダーとの間で、本研究の回転軸角度  $\alpha$  に相当する回転軸角度が90deg. 近く異なっていたことを報告している。また回転量について、浅井ら (2005) がインフロントカーブキックについて、大学サッカー選手を対象とした実験で平均7.8rpsであることを明らかにした一方、新海と布目 (2008) は、サッカーボールの蹴り出されたボールの回転量と軌道について、蹴り出したボールの回転数が1rps程度であるとボールが不規則な軌道で飛翔していくと報告している。これらの先行研究から、蹴り出すボールの回転軸角度や回転量を変化させることにより到達座標を変化させることも、的射方策として十分に考えられる。

しかし、本研究においては回転軸角度について各被験者とも設定条件が変わっても野球の変化球ほど大きくは回転軸角度を変化させていなかった。回転量についても、3つの条件間で有意差が認められたものの、値の範囲は最大でSubj.Dの2.5 rpsであり、カーブキックや無回転のシュートのように回転量を大きく変化させて的射を行っている被験者は見られなかった。

回転軸角度  $\alpha$  に関して、清水と前田 (2012) は回転軸角度  $\alpha$  が到達座標の分布と有意な相関関係にあり、回転軸角度は到達座標に影響を与えることを明らかにしている。また、回転軸角度  $\beta$  に関して、溝田ら (2009) は野球における縦スライダーの研究で、本研究における回転軸角度  $\beta$  がわずかに変化することにより空力特性は大きく変化し、軌道が変化して到達座標にも影響を及ぼすことを報告している。しかし、本研究では到達座標と回転軸角度、回転量との間に有意な相関関係はあまりみられなかった。清水と前田 (2012) の研究では標的位置が被験者の正面一か所のみであり、左右方向の蹴り分けは考慮する必要がなかったこと、溝田ら (2009) の研究では初速度、および投射方向が一定であったことから本研究と異なる結果となっ

たと考えられる。

したがって、本研究の設定条件ではボールに与える回転を変化させることを的射方策を1つとしている被験者はみられず、また的射の正確性に大きく影響するものではないと考えられる。

## V. まとめ

本研究は、サッカーの直接フリーキックにおいて、狙う標的位置やキックポイントを変化させることで、様々なコースに蹴り分ける技術を明らかにすることを目的として行われた。本研究で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 到達座標について、どのキックポイントにおいても左右方向において、到達座標が標的位置よりゴールの中心寄りに分布していることが多く、上下方向に比べて到達座標のばらつきが大きかった。ゴールは上下方向に短く、前方に壁があることから左右方向へのコントロールより上下方向のコントロールを重視した可能性が考えられる。
- 2) 左右方向の蹴り分けについて、被験者、キックポイント、狙う標的位置に関わらず、左右方向の飛び出し角度が重要なパラメータになっていた。設定条件に応じて初速度と左右方向の飛び出し角度を連動して変化させ、的射方策を変化させて最適な角度を変化させる被験者と、的射方策を変化させずに左右方向の飛び出し角度をほぼ一定にして的射を行っている被験者に分けられた。
- 3) 上下方向の蹴り分けについて、上下方向の飛び出し角度と上下方向の誤差の間に相関関係がみられる被験者とみられない被験者に分けられた。前者は、上下方向の飛び出し角度と初速度をともに変化させることで、壁に当たらないように軌道を変化させて到達座標を変化させていたと考えられたが、後者は主に上下方向の飛び出し角度を変化させることで、到達座標を変化させていたと考えられた。

## 文 献

- Asai T., Carré M.J., Akatsuka T. and Haake S.J. (2002) The curve kick of a football I: impact with the foot, *Sports Engineering*, 598(4): 183-192.
- 浅井 武, 菅野博子, 金 達郎 (2003) サッカーのインフロントカーブキックに関する基礎研究, *ジョイント・シンポジウム2003講演論文集*, 12 (3) : 97-100.
- 浅井 武, 斉藤健仁 (2005) ベッカムのフリーキックはなぜ曲



- がるのかーフリーキックのサイエンス, 技術評論社: 東京.
- Bray K. and Kerwin D.G. (2003) Modeling the flight of a soccer ball in a direct free kick, *Journal of Sports Sciences*, 21 (2): 75-85.
- Dessing J.C. and Craig C.M. (2010) Bending It Like Beckham: How to Visually Fool the Goalkeeper, *PLoS ONE*, 5 (10): e13161.
- 古川拓生, 嶋崎達也, 西村康平, 中川 昭 (2012) 近年の世界トップレベルにおける7人人生ラグビーのゲーム様相: 15人制ラグビーとの比較を通しての検討, 9: 25-34.
- 後藤幸弘, 望月康一, 日高正博, 越智祐光 (2010) インステップキック技術の「正確性評価法」作成の試み, *兵庫教育大学研究紀要*, 36: 143-151.
- Ishii H., Yanagiya T., Naito H., Katamoto S. and Maruyama T. (2009) Numerical study of ball behavior in side-foot soccer kick based on impact dynamic theory, *Journal of Biomechanics*, 42: 2712-2720.
- Jinji T. and Sakurai S. (2006) Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball, *Sports Biomechanics*, 5(2): 197-214.
- 甲斐智大, 高井洋平, 青木 竜 (2015) サッカーの勝敗による oriented control play の回数および出現率の違い, *スポーツパフォーマンス研究*, 7: 22-29.
- Kaits A., Giannadakis E., Kannasa T., Amiridisa I., Kellisa E. and Leesb A. (2013) Mechanisms that influence accuracy of the soccer kick, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23: 125-131.
- 川本竜史, 宮城 修, 大橋二郎, 深代千之 (2006) サッカーのインサイドキックにおける speed-accuracy trade-off のメカニズム, *バイオメカニクス研究*, 10 (4): 235-244.
- 公営社団法人 日本プロサッカーリーグ (2014) *J.LEAGUE YEARBOOK 2014*, 朝日新聞出版: 東京.
- 前田正登, 白井信幸 (2008) 野球投手における投球数の増加が投球軌道に及ぼす影響, *トレーニング科学*, 20 (3): 183-193.
- Majelan A., Forhad R. N., Norasteh A. and Arsalan D. (2011) The effects of approach angle and target position on instep kicking accuracy and ball speed with skilled soccer players, *Sport Scientific & Practical Aspects*, 8(2), 35-39.
- 溝田武人, 古賀勇揮, 加藤弘晃, 鳴川敏喜, 長谷川淳哉, 川端裕樹, 田邊康宏 (2009) 回転軸方向のわずかな変化にともなう縦スライダー系硬式野球ボールの空力特性と軌道変化, *ジョイント・シンポジウム2009講演論文集*: 170-173.
- 水谷未来, 亀井麻依, 山崎大嗣, 高井洋平, 前田 明 (2014) 大学サッカー選手におけるインステップキックの異なるボール速度が正確性に与える影響, *トレーニング科学*, 25 (3): 225-232.
- 鍋谷清治 (2007) 野球データの統計的分析, *日本統計学会誌*, 36 (2): 91-115.
- 永見智之, 彼末一之, 諸星 潤, 大室康平, 茶川剛史, 勝亦陽一, 氏原洋輔, 子安大士, 前川 仁, 小宮山悟 (2008) 一人のプロ野球投手が投げる8種類の投球のボール回転, *ジョイント・シンポジウム2008講演論文集*: 108-111.
- Nasu D., Matsuo T. and Kadota K. (2014) Two Types of Motor Strategy for Accurate Dart Throwing, *PLoS one*, 9 (2): e88536.
- Ozaki H. and Aoki K. (2007) Kinematic and Electromyographic Analysis of Infront Curve Soccer Kick, *Football Science*, 5: 26-36.
- 瀬尾和哉, 浅井 武, 小林 修 (2005) サッカーカーブキックの飛行時間と曲がり幅に関する最適化, *ジョイント・シンポジウム2005講演論文集*: 102-107.
- 清水雄一, 前田正登 (2012) サッカーインフロントキックにおける射の正確性, *トレーニング科学*, 24 (1): 47-56.
- 新海宏成, 布目寛幸 (2008) 無回転ブレ球キックのボールインパクト, *バイオメカニクス研究*, 12 (4): 252-258.
- 下野智史, 塩川満久, 高橋和文, 鷹井祥夫 (2007) ボールの回転軸に着目した直接フリーキックにおける三次元動作解析, *バイオメカニクス研究*, 11 (1): 25-37.

平成27年2月4日受付

平成27年5月25日受理



