



ボール速度に関する先行情報に基づく予測がキャッチ動作に与える影響

新立, みずき
河辺, 章子

(Citation)

身体行動研究, 7:21-32

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81010193>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81010193>



ボール速度に関する先行情報に基づく予測が キャッチ動作に与える影響

Effects of anticipation based on preceding information of ball speed on one-handed catching

新立 みずき*・河辺 章子**

Mizuki SHINDATE, Shoko KAWABE

Abstract: This study was designed to investigate the effects of anticipation based on preceding information of ball speed on one-handed catching. Each subject sat on a chair and caught in one hand a table-tennis ball shot out from ball-serving machine 2.5m ahead. Ball speed was controlled using three types of fast, normal, and slow speed. Three experimental conditions were set up: in control condition, balls of only one speed were caught in a block, in random condition, balls of three types of speed were randomly caught in a block. In feinting condition, after the fast (or slow) speed ball were caught in several trials, the normal speed ball was caught in the unexpected trial. The results obtained were as follows:

- (1) In the presence of the preceding information on the fast ball speed, both the initiation of catching motion and elbow flexion motion were affected by the preceding information.
- (2) In the presence of the preceding information on the slow ball speed, the initiation of catching motion was considerably delayed. However, the whole catching motion was rapidly and the elbow joint angle range was increased.
- (3) It was suggested that the timing of catching motion was able to be corrected even if the anticipation was incorrect, as long as the time of about 720 ms was given in ball catching motion.
- (4) Duration of muscle activities for grasping a ball was constant in spite of the preceding information and ball speed. The activities were initiated at 90 ms before the impact of grasping a ball.

Keywords: catching, anticipation, pre-information, ball-speed

1. 緒言

「キャッチ」とは動くターゲットを捕捉することである。バスケットボールのパスキャッチ、野球における野手の捕球やゴールキーパーのシュートブロックのようにターゲットの運動を止めるものだけでなく、テニスの打球、野球のバッティング、バレーボールのサーブやレシーブのように、ターゲットとの接触（インパクト）によってターゲットの運動を変化させるもの、また上肢を使うばかりでなく、サッカーのトラッピングやラグビーのタックルなども、ターゲットを捕捉するという点では共

通している。したがってこれらはすべてキャッチ動作に含まれる。

大築（1988）はキャッチ動作を、ターゲットに関する感覚情報の収集、その分析と判断、それらに基づく予測という脳の働きを経て、最終的にオープンループ型の動作として発現すると説明している。キャッチ動作を開始した後もターゲットに関する情報収集が行われ、必要に応じて動作が修正される。この間の動作は、予測を伴っているものの、フィードバック情報を利用して動作を修正することができるクローズドループ型の動作である。

* : 財団法人島前ふるさと魅力化財団, ** : 神戸大学大学院人間発達環境学研究所

しかし、キャッチ動作の最終局面は、ターゲットにタイミングを合わせて修正なしで一気に実行されるオープンループ型の動作である。ターゲットにタイミングを合わせるためには、高い予測能力が要求される。

キャッチ動作に必要な予測は、標的の到達位置に関する空間的な予測と標的の到達時間に関する時間的な予測に大別できる (大築, 1998)。特にキャッチ動作の最終局面においてタイミング予測の正確さは、キャッチの成否に大きく左右する。キャッチ動作とタイミング予測に関する研究は数多くなされており、その多くは、インパクトのタイミングに着目したものである。

Lacquaniti & Maioli (1989a, 1989b) は、被験者の手に向かって自然落下させたボールをキャッチさせる実験を行い、手根および肘関節の伸筋、屈筋においてインパクトの 100~200 ms 前に筋活動が現れたことを報告している。さらに、視覚を遮るとこのインパクト前の筋活動は生じなくなるが、音によって落下のサインを与えた場合には筋活動が現れることも報告している。これにより、落下中のボールの運動 (落下速度、加速度) に関する視覚情報に限らず、落下運動が開始される前の情報も、キャッチのタイミング予測には利用されることが示された。

Vishton et al. (2010) は、ボールの落下をインパクトの直前に止めることで、インパクトそのものによる筋活動と区別して、予測による筋活動を評価している。Lacquaniti & Maioli (1989a) と同様、インパクトのタイミングが予測可能な状況では、インパクトの有無に関わらず、筋活動が見られることが示された。また彼らは、ボールを落下させる高さによってインパクト前の筋活動開始のタイミングに変化がなかったことから、高さを変化させても 1 試行ごとにインパクトのタイミングを計算していることを報告した。これらの研究におけるキャッチ動作は、落下してくるボールを受け止めるもので、実際のスポーツ場面で要求されるキャッチ動作との間には乖離がある。

Tijtgat et al. (2010) は、より実際のスポーツ場面に近いキャッチを課題とした研究を行った。前方から飛来するボールキャッチを課題として、ボール速度に関する先行情報がキャッチ動作とパフォーマンスに与える影響を検討した。同じ速度のボールを連続してキャッチさせるブロック条件、4 種類の異なる速度のボールをランダム化してキャッチさせるランダム条件を設定し、前者を先行情報あり、後者を先行情報なしとして、それぞれのキャッチ動作を比較した。その結果、ブロック条件では、ボール速度によって動作速度および動作の立ち上が

り速度が変化したのに対し、ランダム条件では動作開始後 100 ms 間の動作にほとんど違いがなかったことが示された。この結果から、次の試行のボール速度の予測に、それ以前の試行のボール速度情報が利用され、ブロック条件では予測に基づいてそれぞれの速度に合わせた動作を行ったと述べている。ランダム条件でブロック条件よりもキャッチミスが増加したものの、条件間に有意な差はなく、ボール速度の先行情報がキャッチの成否に影響を与えるか否かについては不明としている。

このように予測がキャッチ動作に果たす役割は大きい。しかし、対人スポーツにおいては、予測をしたことによって相手の作戦にかかり、かえって不利な状況に陥ることがある。野球において、投手が打者のタイミングを外すために投球に緩急をつける戦略を用いるが、これはタイミング予測に対するフェイントとみなすこともできる。投球されるボールの速度に対する予測があるために、予測が裏切られた場合、開始しかけた動作、あるいはすでに開始した動作の修正が必要となる。動作のタイミングの修正に関する研究は、その多くがターゲットの移動中の速度変化が運動修正に与える影響を検討している。中本・森 (2008) は、野球の熟達と標的の速度変化に対するタイミング修正の関係を検討している。移動指標の到達にタイミングを合わせてボタンを押す課題において、到達の 100~300 ms 前に移動速度を加速または減速させ、タイミング誤差を評価した。この結果、減速条件において加速条件よりも大きなタイミング誤差が生じることが示され、減速条件における運動修正には、開始しかけた動作の抑制が必要であることから、抑制による修正は困難であることを示した。また、速度変化前のボール速度はタイミング誤差に影響を与えなかったのに対し、速度変化後、運動修正に与えられた時間が増加するとタイミング誤差が減少したことを報告した。ターゲットの移動速度変化に対するタイミング誤差が加速よりも減速時に大きくなることは、Teixeira et al. (2006) の研究でも報告されている。さらに彼らはもう一步踏み込んで、速度変化から 300 ms 以上の時間が与えられると、フィードバック情報に基づいた運動修正が可能になると結論づけている。

これまでキャッチ動作に対するタイミング予測の影響を検討した研究は行われているが、その多くはインパクトのタイミングに対する予測が対象とされていた。しかし、キャッチ動作におけるタイミング予測には、ターゲットが動き出す前の情報も利用されていることが考えられる。また、予測していたタイミングが外されると、すでに開始した動作、もしくはこれから開始しようとして

いる動作のタイミングを修正することが必要となる。さらに、その予測がターゲット速度を速い方に誤っていたのか遅い方に誤っていたのかという差異が、その後の応答に影響を与えるのではないかと考えられる。

このような観点から、本研究では被験者にボール速度に関する先行情報を与え、その情報とは異なる速度のボールをキャッチさせることで、タイミングを外された(予測がはずれた)際のキャッチ動作の特徴を検査することができると考えた。本研究の目的は、ボール速度に関する先行情報に基づく予測がキャッチ動作に与える影響について検討することとした。

2.方法

2-1 被験者

被験者は男性 8 名 (年齢: 22.6 ± 2.1 歳, 身長: 171.8 ± 4.9 cm, 体重: 63.3 ± 8.0 kg) であった。各被験者の経験スポーツ, 利き腕および左右の矯正視力を表 1 に示した。

表 1 被験者の経験スポーツ, 利き腕および視力

被験者	スポーツ経験	利き腕	視力	
			右	左
A	陸上 (中長距離)	右	0.8	0.8
B	水泳	右	0.3	1.0
C	テニス	右	0.8	0.8
D	野球	右	1.0	1.0
E	野球	右	1.5	1.5
F	野球	右	1.0	1.0
G	陸上 (短距離)	右	1.2	1.2
H	陸上 (短距離, 跳躍)	右	0.9	0.9

研究の実施時には、ヘルシンキ宣言を遵守し、各被験者にはあらかじめ本研究の主旨と内容を説明し、個人の意味で中止や中断が可能であることなどを伝えた上で、実験の被験者となることの同意を書面にて得た。

2-2 装置

図 1 に実験装置を示した。ボール発射速度を自在に変えられる小型卓球マシン(robopong1040, 三英)を用い、その発射口に樋 (半径 50 mm の半円筒, 2.5 m) をボールガイドとして設置した (傾き 5.6°)。卓球ボールは直径 40 mm のものを使用した。発射口の両脇にビームセンサ (アンプ内蔵超小型ビームセンサ EX-20, Panasonic) を設置し、ボールの発射時点を記録した。

筋電図は、指屈筋群および指伸筋群から双極表面電極法により表面電極を用いて導出した。肘関節にゴニオメータ, 前腕上の橈骨遠位端より 2 cm 程度の位置に 3 軸加速度計 (DL-111, S&ME 社), ボールと手の接触を記録するために、手掌上 (示指・中指の中手節関節の間に感圧センサ (S100, DKH 社) を装着した。さらに、利き手側の大腿上に 5 cm 四方のスイッチ (OFL-SG-P2, 大阪自動電気社) を設置し、動作開始を記録した。また、卓球マシンの音を遮断するために、音刺激装置 (acoustic stimulator, EE11-112, NEC) を用いてヘッドホンより 80~90 dB のホワイトノイズを流した。すべての記録はサンプリングレート 1 kHz で A/D 変換し、ハードディスクに保存した。

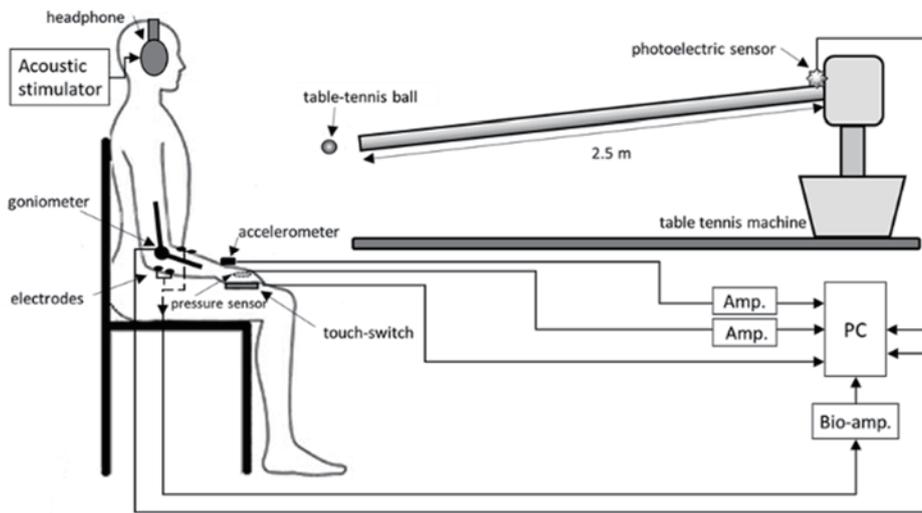


図 1 実験装置の概要

2-3 課題

被験者は椅座位で、2.5 m 斜前方から肩先にむけて発射されるボール（ボールガイド上を転がり落ちてくる）を利き手で素早く捕球することを動作課題とした。利き手側の大腿上に設置したタッチスイッチに手を置いた状態をスタートポジションとし、キャッチ動作後、このポジションに手を戻すまでを 1 試行とした。被験者には、ボールをキャッチする動作の間以外は、手をスイッチ上に置くことや、できるだけ多くキャッチすることを指示した。

2-4 条件

ボール速度は fast, normal, slow の 3 種類を用いた。各速度の詳細は表 2 に示した通りである。速度に対する予測を検討するために、コントロール条件 (C)、ランダム条件 (R)、フェイント条件 (F) の 3 条件を設けた。

表 2 ボール速度

	fast	normal	slow
平均 speed (m/s)	6.3	4.4	3.3
2.5 m 所要時間 (ms)	400	570	750

コントロール条件ではブロック内で一定速度のボールのみが発射され、ランダム条件では 3 種類の速度がランダムに発射される。フェイント条件では 1~3 試行の fast (または slow) 速度の後、4~10 試行目の予期できない試行目に normal 速度が発射される。この予期できない normal 速度の試行をフェイント試行と定義し、フェイント試行によってフェイント条件の各ブロックは終了とした。したがって、実験条件はコントロール、ランダムについては各 3 条件 (fast, normal, slow)、フェイントについては 2 条件 (fast, slow) の計 8 条件とした (以下、順に C-f, C-n, C-s, R-f, R-n, R-s, Ff-n, Fs-n 条件と略す)。

2-5 手続き

被験者は椅子に座り、動作中に姿勢が変化しないよう、ベルトで腰部を椅子に固定した状態で課題を行った。まず、ボールと速度に慣れさせるために、ヘッドホンを除くすべての装置を取り付けた状態で練習を行い、それぞれの速度において 10 球中 7 球キャッチできるようになったことを確認した後、本試行を実施した。

コントロール条件とランダム条件については、それぞれ 60 試行ずつ (3 速度×20 試行)、フェイント条件は fast 速度を数試行連続させてから normal 速度をキャッチさせる Ff-n (Feint fast-normal) 条件, slow 速度を数試

行連続させてから normal 速度をキャッチさせる Fs-n (Feint slow-normal) 条件それぞれで、normal 速度の試行であるフェイント試行が 20 試行となるように 20 ブロックずつ行った。フェイント試行は 4~10 試行目のいずれかで行われるため、フェイント条件の試行数は、2 条件 (Ff-n, Fs-n) × 4~10 試行 × 20 ブロック (Ff-n 条件 : 151 試行, Fs-n 条件 : 147 試行) であった。コントロール、ランダム、フェイントの条件順および速度の順序はランダム化した。

2-6 測定項目

図 2 に 1 試行の典型例とともに測定項目を示し、以下にその詳細をまとめた。

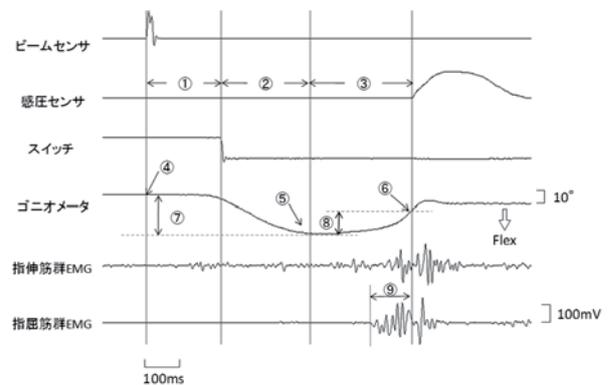


図 2 記録例と測定項目

- (1) キャッチ成功数 : 全試行のキャッチの成否
- (2) 動作時間 : 以下の 3 項目を測定した。
 - ①LT (latency) : ビームセンサ立ち上がりからスイッチオフまでの時間, すなわち, ボールが発射されてから手が膝上から動き始めるまでの時間
 - ②FT (flexion time) : スイッチオフから肘関節最大屈曲位までの時間, すなわち, 手が膝上から離れて肘関節が最大屈曲するまでの時間
 - ③ET (extension time) : 肘関節最大屈曲位から感圧センサ立ち上がりまでの時間, すなわち肘関節が最大屈曲してから手にボールが入るまでの時間
- (3) 肘関節角度 : 被験者ごとに、実験前後に行ったゴニオメータのキャリブレーション値の平均値を用いて計測値を角度に換算した。肘関節角度については以下④~⑥の 3 項目, および肘関節角度変化量を⑦⑧に示す 2 項目とした。
 - ④pre-angle : ビームセンサ立ち上がり時の肘関節角度 (スタートポジション時)
 - ⑤peak-angle : キャッチング動作中最も屈曲した肘関節角度

⑥catching-angle：感圧センサ立ち上がり時の肘関節角度（ボールキャッチ時）

⑦flexion-range：pre-angleとpeak-angleの差

⑧extension-range：peak-angleとcatching-angleの差

(4) EMG duration

⑨EMG duration：指屈筋群の筋活動開始から感圧センサ立ち上がりまでの時間

2-7 統計処理

得られたデータは、多用途生体信号解析ソフト（BIMUTAS II，キッセイコムテック）を用いて解析した。得られた計測値は統計解析パッケージ（SPSS ver12.0，SPSS）を用いて統計処理を行った。実験条件を要因とする二元配置分散分析を行った。主効果に有意な差がみられたものについては、Scheffé法による多重比較検定を行った。

3.結果

3-1 キャッチ成功率

8条件（各20試行）のキャッチ成功率の平均値を表3に示した。R-f条件で最も低く、次にC-f条件で低い値であった。また、C-n，C-s，R-n，およびR-s条件ではキャッチ成功率が高い。分散分析の結果，R-f条件はC-f条件，Ff-n条件を除くすべての条件より有意に低い値であった（ $F(7, 63) = 7.84, p < 0.001$ ）が，C-f条件，Ff-n条件と他の条件との間に有意な差は認められなかった。

R-f条件，C-f条件の成功率が低いことから，fast速度はnormalおよびslow速度に比べると難易度が高かったことが明らかになった。

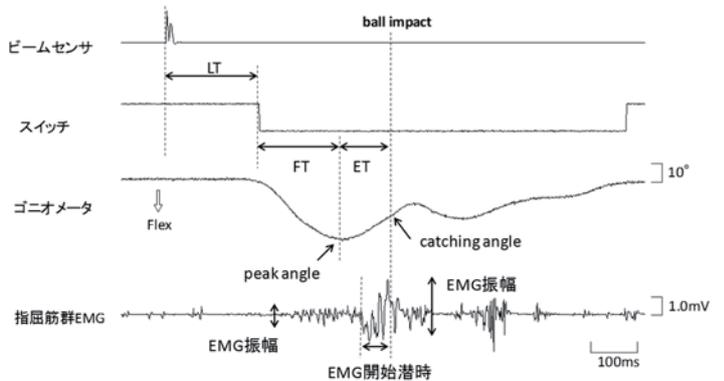
表 3 条件ごとのキャッチ成功率 (mean (SD), %)

	速度条件					
	fast		normal		slow	
Control	79.4	(11.2)	95.6	(3.2)	96.9	(3.7)
Random	71.9	(14.1)	96.3	(3.5)	96.3	(5.2)
Feint	89.4	(12.9)	---		92.5	(12.2)

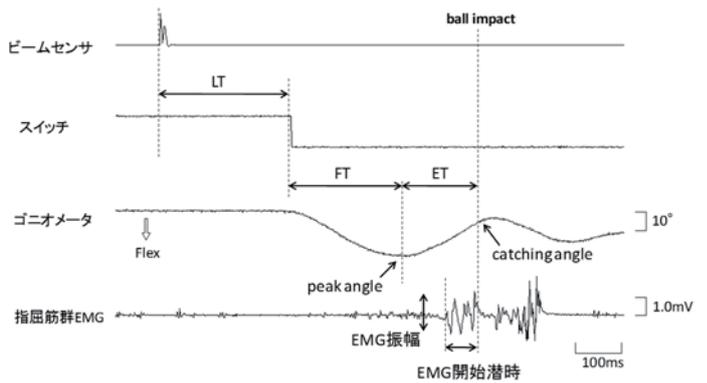
3-2 キャッチ動作の特徴—コントロール条件

図3(a)(b)(c)は，コントロール条件における三つの速度条件における典型的なキャッチ動作の記録例である。ボールは卓球マシンから発射された直後ビームセンサの間を通過し，ビームセンサによってボール発射のシグナルが発生する。ボールの発射に対し，まずスイッチから手を離して動作を開始するためスイッチがオフになる(LT)。動作開始と同時に肘が屈曲していき，最大屈曲

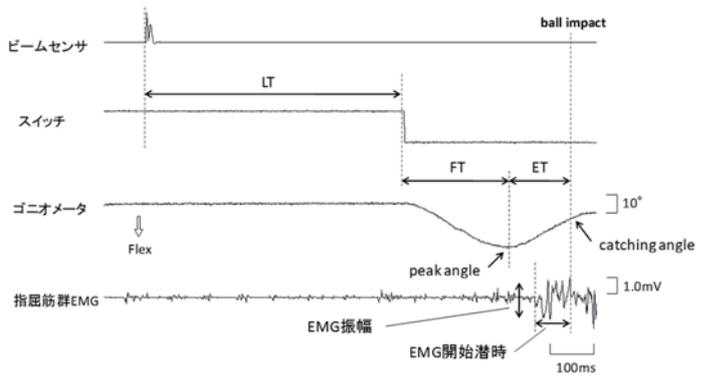
角度に達し(FT)，その後肘の動作は伸展動作へと切り替わり，肘関節伸展動作中に大きな指屈筋群の筋活動が現れる。この筋活動の直後にボールをキャッチした際の圧力が感圧センサによって記録される(ball-impact)。



(a) C-f 条件



(b) C-n 条件



(c) C-s 条件

図 3 コントロール条件における典型的なキャッチ動作の記録例 (a) C-f条件, (b) C-n条件, (c) C-s条件

コントロール条件では、特に LT においてボール速度が遅いほど延長するのがわかる。肘関節角度についてみると、(a)C-f 条件において他の 2 条件より peak-angle および catching-angle が大きく、より深く肘を屈曲させていることがわかる。

また、筋電図においては、ボールインパクトの約 100 ms 前からボールをつかむための筋放電が現れたが、それ以前にもキャッチのための構えのためか、振幅の小さい筋活動が記録されている。インパクト時刻を基準としたキャッチ直前の筋活動の開始時刻は、全体として大きな差はみられない。

以上のように動作開始までの時間 (LT) と動作時間 (ET および FT)、肘関節の最大屈曲角度 (peak-angle)、キャッチ時の角度 (catching-angle) にキャッチ動作の特徴が現れると考え、これらの項目に着目してボール速度およびボール速度に対する予測によるキャッチ動作の違いを検討した。

(1) 時系列変化からみたキャッチ動作

ボール発射から動作開始時点 (スイッチから手離れた時点) を 0 ms として LT, FT, および ET の各平均値を図 4 に示した。どの時間相もボール速度が遅いほど大きい値を示し、動作時間が延長した。特に LT には速度によって大きな差が見られ、一方 FT では比較的小さい差であった。分散分析の結果、いずれの動作時間においても条件間に有意な差が認められた (LT : $F_{(3, 633)} = 232.45, p < 0.001$, FT : $F_{(3, 630)} = 17.86, p < 0.001$, ET : $F_{(3, 404)} = 24.08, p < 0.001$)。さらに多重比較の結果、LT については 3 条件すべての間の差が有意であった。FT および ET については、C-s 条件において C-f および C-n 条件よりも有意に大きい値を示した。ボール速度が予測できるコントロール条件において、被験者は動作開始までの時間を調整することで速度の変化、すなわちボールの到達時間の変化に対応しているが、特に slow 速度に対しては、動作にかかる時間も延長させていることが示された。

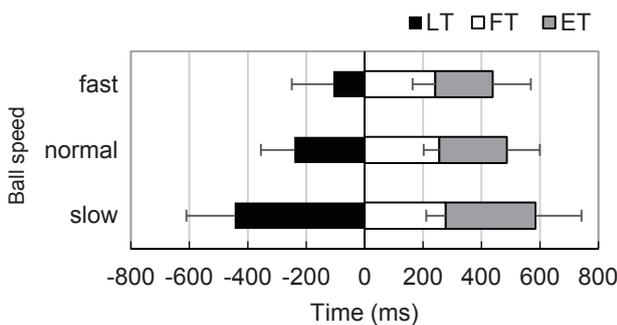


図 4 コントロール条件における LT, FT, および ET

(2) 肘関節角度変化からみたキャッチ動作

Pre-angle, peak-angle, および catching-angle の平均値を速度別に図 5 にプロットした。最大屈曲時およびキャッチ時の肘関節角度は、ボール速度が遅くなるほど浅くなる傾向がみられた。分散分析の結果、pre-angle については、有意な差は認められず、peak-angle, catching-angle の 2 項目で条件間に有意な差が認められた (peak-angle : $F_{(2, 465)} = 23.39, p < 0.001$, catching-angle : $F_{(2, 382)} = 23.64, p < 0.001$)。

Peak-angle 及び catching-angle については、C-f 条件では C-s および C-n 条件よりも有意に低い値を示した。これはコントロール条件においてボール速度が速い場合に、深く肘を屈曲させていることが示された。

ボールのキャッチには肘関節の屈曲と伸展の両局面があり、それぞれの屈曲量、伸展量をそれぞれ flexion-range, extension-range として算出し、

図 6 にその平均値を示した。Flexion-range はボール速度が遅くなるほど減少したが、extension-range はボール速度が変化してもほぼ一定値を示した。分散分析の結果、flexion-range においてのみ主効果に有意差が認められた ($F_{(2, 459)} = 12.05, p < 0.001$)。Flexion-range についてさらに多重比較を行ったところ、C-f 条件と C-n および C-s 条件の間に有意差が得られた。つまり、コントロール条件においては準備期の前腕の位置、および肘関節最大屈曲からボールと手の接触肘関節角度の変位を変えずに、ボールと接触する位置を変えることで fast 速度に対応しており、そのために最大屈曲位を変化させていることが示された。

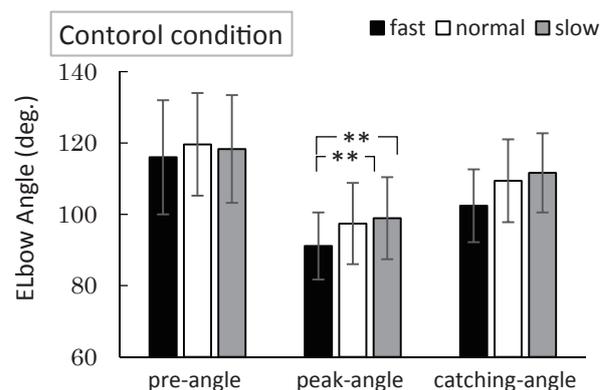


図 5 コントロール条件における肘関節角度 (** : $p < 0.01$)

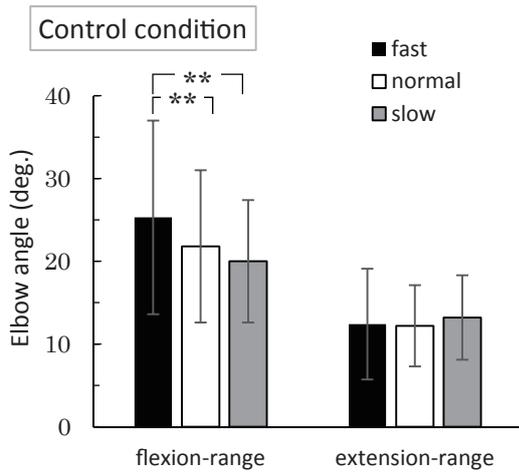


図 6 コントロール条件における肘関節角度変化量 (**:p<0.01)

3-3 ボール速度に関する先行情報による影響

ボール速度に関する先行情報（予め速度がわかっている（コントロール条件）、わからない（ランダム条件））による応答の違いを検討するために、キャッチする試行のボール速度が normal 速度である 4 条件（C-n, R-n, F-s, F-f）における LT~ET の平均値を図 7 に示した。LT については、Ff-n, R-n, C-n, Fs-n 条件の順に延長し、分散分析の結果、条件の主効果は有意であり ($F_{(3, 634)} = 77.50, p < 0.001$)、多重比較の結果、すべての条件間の差に有意性が認められた。

一方、FT はほぼ一定の値であり、Fs-n 条件のみ他の 2 条件より短い値であったが ($F_{(3, 634)} = 7.70, p < 0.001$)、Ff-n, R-n, および C-n 条件の間に有意な差は認められなかった。ET は LT と全く逆の順で、Ff-n 条件が、R-n, C-n, Fs-n 条件の順に減少し、($F_{(3, 402)} = 19.92, p < 0.001$) Ff-n および R-n 条件は C-n, Fs-n 条件より有意に大きな値であった。

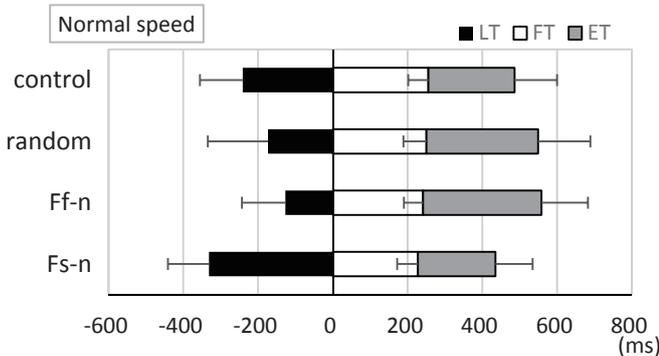


図 7 Normal 速度ボールのキャッチング時における LT, FT, および ET

この 4 つの条件ではすべて normal 速度のボールをキャッチするが、先行する情報が動作開始のタイミングに影響を与えることを示している。動作開始が遅れた Fs-n 条件については FT が短縮したが、LT で生まれた時間差は FT よりも ET に反映されることが示唆された。

(1) 各局面における肘関節角度

Pre-angle, peak-angle, および catching-angle の平均値と標準偏差を条件別に表 5 に示した。Pre-angle と peak-angle では C-n 条件において最も浅く、Fs-n 条件で最も深く屈曲していた。Catching-angle については、Ff-n, R-n 条件で、C-n 条件や Fs-n 条件より肘を伸ばした状態でキャッチしており、分散分析の結果、いずれの項目においても有意な差がみられた。 ($F_{(3, 634)} = 7.94, p < 0.001, F_{(3, 634)} = 14.31, p < 0.001, F_{(3, 402)} = 6.83, p < 0.001$)

Pre-angle について多重比較の結果、C-n 条件と R-n および Fs-n 条件の差に有意性が認められた。peak-angle では、C-n 条件が他の条件より有意に大きい値を示し、R-n 条件も Fs-n 条件と比較すると有意に大きい値であった。R-n 条件と Ff-n 条件、および Ff-n 条件と Fs-n 条件の間には有意差はみられなかった。Catching-angle については、Fs-n 条件において R-n および Ff-n 条件よりも有意に深く屈曲していたことが示された。

表 5 先行情報の異なる normal 速度ボールキャッチ時の肘関節角度

	pre-angle	peak-angle	catching-angle
C-n	119.6 ± 14.4	97.4 ± 11.4	109.4 ± 11.6
R-n	115.4 ± 13.6	94.5 ± 9.2	111.8 ± 11.6
Ff-n	116.6 ± 8.5	93.4 ± 5.8	112.0 ± 10.9
Fs-n	113.3 ± 7.8	90.8 ± 8.6	106.2 ± 11.9

] : p<0.01

(2) 肘関節角度の変化量

図 8 に、flexion-range および extension-range の平均値を条件ごとに示した。Flexion-range はいずれの条件でもあまり変化はなく、分散分析において有意な差は認められなかった。

Extension-range は、C-n 条件で非常に小さく、分散分析の結果、有意差が認められ ($F_{(3, 514)} = 12.66, p < 0.001$)、C-n においてのみ他の条件より有意に角度変化量が小さいという結果が得られた。このことから、C-n 条件において肘を動かす範囲が最も小さく、ボール速度に関する先行情報が与えられており、最も無駄の少ない動作でキャッチングを行っていたことがわかる。

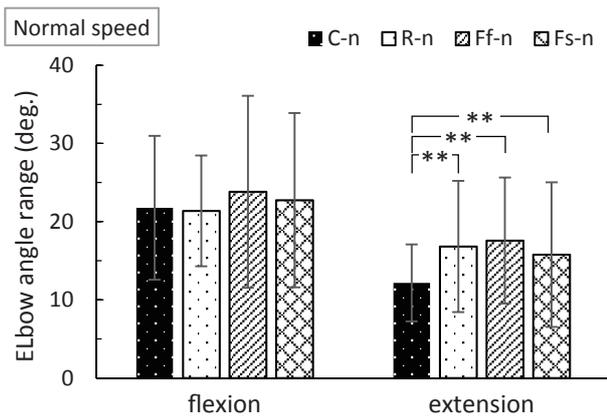


図 8 Normal 速度ボールのキャッチング時における肘関節角度変化量 (** : p<0.01)

3-4 誤った先行情報を与えた場合

Ff-n 条件では fast 速度の先行情報を与えておいて normal 速度のボールをキャッチさせ、Fs-n 条件では逆に slow 速度の先行情報を与え、normal 速度のボールをキャッチさせた。この誤った先行情報の違いがキャッチの応答に与える影響を検討するために、これらの条件に加えてコントロール条件における fast と slow 速度でのキャッチ動作について検討した。

(1) 動作時間

C-f, C-s, Ff-n, Fs-n 条件における LT, FT, ET の平均値を図 9 に示した。LT は C-f 条件と Ff-n 条件において非常に小さい値を示し、Fs-n 条件も C-s 条件に比べて小さい値であった。分散分析の結果、条件による差は有意であり ($F_{(3, 633)} = 232.45, p < 0.001$)、多重比較において C-f, Ff-n 条件では Fs-n および C-s 条件より有意に短く、Fs-n 条件も C-s 条件より有意に短いという結果が得られた。

FT では、C-s 条件において延長がみられた。分散分析によって有意差が認められ ($F_{(3, 630)} = 17.86, p < 0.001$)、多重比較を行ったところ、C-s 条件と他の条件との差がそれぞれ有意であり、C-f, Ff-n, Fs-n の 3 条件の間に有意な差はなかった。

ET では、C-s, Ff-n 条件において C-f, Fs-n 条件より大きい値となった。分散分析の結果は有意であり ($F_{(3, 404)} = 24.08, p < 0.001$)、多重比較によって C-s, Ff-n 条件は C-f, Fs-n 条件より有意に ET が延長したことが示された。

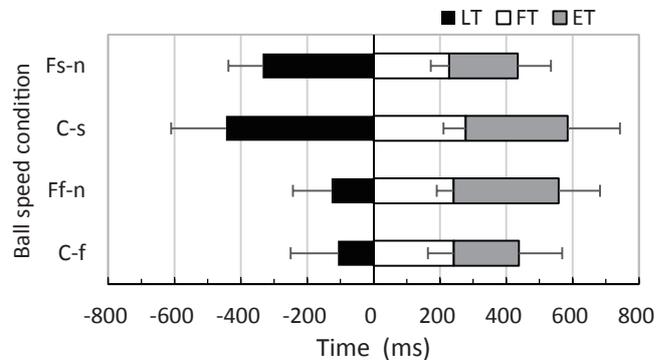


図 9 誤った先行情報を与えた場合の LT, FT, ET

(2) 肘関節角度と変化量

Pre-angle, peak-angle, catching-angle, flexion-range および extension-range の平均値と標準偏差を表 6 にまとめた。Pre-angle は多少の違いはあるが、条件間のばらつきは小さかった。Peak-angle では、条件間に有意差がみられ ($F = 14.31, df = 3, 618, p < 0.001$)、C-s は C-f, Ff-n, Fs-n の 3 条件より有意に大きく、C-s 条件では他の条件に比べて、肘関節の屈曲が浅かったことが示された。

3-5 把握動作のための筋活動時間

指屈筋群筋活動時間（筋活動開始から手掌に貼付した感圧センサが反応するまでの時間）の平均値と標準偏差を表 7 に示した。条件によって多少の変動はあるが、いずれの条件も約 90 ms 程度であり、分散分析の結果、条件間に有意な差はみられなかった。

表 6 条件ごとの肘関節角度と変化量 (degree, mean±SD, **:p<0.01)

	pre-angle	peak-angle	catching-angle	flexion-range	extension-range
C-f	116.0 ± 16.0	91.1 ± 9.4	102.4 ± 10.2	25.3 ± 11.7	12.4 ± 6.7
Ff-n	116.6 ± 8.5	93.4 ± 5.8	112.0 ± 10.9	23.8 ± 12.3	17.6 ± 8.1
Fs-n	113.3 ± 7.8	90.8 ± 8.6	106.2 ± 11.9	22.7 ± 11.1	15.8 ± 9.2
C-s	118.3 ± 15.1	98.9 ± 11.5	111.6 ± 11.1	20.0 ± 7.4	13.2 ± 5.1

表 7 指屈筋群筋活動開始時間 (mean±SD, ms)

条件	指屈筋群筋活動開始
C-f	92.2 ± 35.6
C-n	90.6 ± 33.7
C-s	95.1 ± 31.4
R-f	82.8 ± 31.8
R-n	86.8 ± 26.7
R-s	92.6 ± 26.8
Ff-n	88.5 ± 35.8
Fs-n	90.9 ± 48.8
全体平均	90.5 ± 34.5

4. 論議

4-1 速度による影響

ボール速度を変化させることで、LT が大きく変化したことから、被験者は自身の動作時間の見積もりに基づいて動作を開始しており、動作開始前にすでに構成された運動プランの開始タイミングを調整することでボール速度の違いに適応したと考えられる。ここでの運動プランとは、分割できない動作をどのように組み合わせで一連の運動とするかの計画という意味で用いる。また、コントロール条件において、slow 速度の場合に動作開始からキャッチまでの時間が有意に延長した。本研究では、fast 速度と normal 速度の間に有意差はみられなかったが、速度が遅くなるにつれて動作時間が延長する傾向を示したことから、計画する運動プランの時間自体を、ボール速度に応じて変化させる可能性が示唆された。本研究では、本試行前に全被験者に本試行と同じ速度での練習を行わせたため、ボール速度ごとの運動プランが形成された可能性がある。

ボール速度による変化として、肘関節の最大屈曲角度およびキャッチ時の肘関節角度にも変化がみられた。normal, slow 速度間には有意差がみられなかったが、ボール速度が速くなると肘を深く屈曲させる傾向があることが明らかになった。

これを屈曲量 (flexion-range) と伸展量 (extension-range) からみると、屈曲量はボール速度が速いほど大きくなるが、伸展量はほとんど変化しないことが分かった。コントロール条件ではボール速度が予測可能であるため、被験者は予測されるボール速度に合わせた最も効率的な動作を行ったと推測できる。前半の肘関節屈曲動作は大きくなるが、後半の伸展動作は速度に関わらず常に同様の動作として遂行しようとすることを示している。これに

よってキャッチの最終局面の再現性を高め、把握動作のタイミングを安定させていたと考えられる。ただし、肘関節最大屈曲からキャッチまでの時間は変化しているため、前腕の動作速度はボール速度の影響を受けていたと考えられる。

4-2 先行情報による影響

Normal 速度のボールをキャッチさせた 4 条件 (C-n, R-n, Ff-n, Fs-n) ではキャッチするボールの速度は同じなので、先行情報によるキャッチ動作への予測の影響をみることができる。本研究では、1 試行前までのボール速度という先行情報を操作することで、C-n 条件は正確な予測あり、R-n 条件は正確な予測なし、Ff-n 条件は fast 速度という誤った予測あり、Fs-n 条件は slow 速度という誤った予測ありという状況を想定した。実際に近づいてくるボールの速度は同じであっても、先行情報の違いによって LT は大きく変化した。先行情報によって被験者がボール速度を予測したことで LT が変化したと考えられる。

多くの球技スポーツでは、投球者の投球フォームを見ることで、ボールが投げ出される (蹴りだされる、打ち返される) タイミングは予測が可能である。本研究においても、ボールの発射間隔を一定にすることで、ボールの発射されるタイミングが容易に予測できるようにした。刺激に対する単純反応課題において、刺激発現のタイミングが予測できれば反応時間が大幅に短縮し、刺激が動作開始のトリガーでなくなることは一般に知られている。本研究の LT はキャッチ動作開始までの時間であり、刺激に対して出来るだけ早く動作を起こす反応時間とは異なるものであるが、少なくともボールの発射が動作開始のタイミングを決定するうえで重要な情報となるはずである。そのボール発射のタイミングを予測していたことで、実際に発射されたボール速度の確認は動作開始の指令と独立して行われ、動作開始時間が先行情報によって大きく影響を受けたと考えられる。このことから、ボール発射のタイミングが正確に予測できる状況では、動作開始のタイミングには、実際のボール速度に関する視覚情報よりも、ボール発射以前の次試行のボール速度に対する予測の寄与が大きいことが窺える。

動作開始以前からボール速度が予測できている場合、その速度に適応した動作が遂行されるため、normal 速度に対する応答としては、C-n 条件の応答が最適であったことが推察される。動作開始後、C-n 条件、R-n 条件、Ff-n 条件の FT および flexion-range に違いはなかったことから、肘の屈曲動作の大きさ、速さに差はみられな

かった。しかし、pre-angle はコントロール条件で有意に小さい値を示し、正確な予測ができない状況では、ボール発射前から肘を深く屈曲させておく傾向がみられた。予測が確かでない分、準備時に構えが形成されたためだと考えられる。

キャッチ動作の肘関節伸展量 (extension-range) は、コントロール条件ではボール速度が違ってもおおよそ 12 度で一定であったのに対し、R-n 条件、Ff-n 条件、および Fs-n 条件において C-n 条件より有意に増加した。ボール速度に関わらず、インパクトのタイミングが正確に予測できれば肘関節伸展量は最小となることがわかる。反対に、予測が不確かな場合は実際のボール速度を見てタイミングを合わせる必要があるが、インパクトのタイミングはボール速度だけでなく、手の接近速度にも左右される。そこで、肘伸展動作の速度や変位を変えることで、ボールと手が近づく速さおよびキャッチのタイミングを調整し、適切なタイミングで把握動作を開始しやすくしている可能性が考えられる。

4-3 Ff-n 条件の応答特性

Fast 速度のボールが来ると予測している Ff-n 条件では、LT は C-n 条件より大幅に (約 110 ms) 減少し、C-f 条件とほぼ同じ値であった。これにより、Ff-n 条件において動作開始のタイミングが予測によって決定され、実際のボール速度の判断によらないことが示された。Fast 速度のボールをキャッチするには短い時間でキャッチ動作を完了しなければならないので、LT を短縮させるためにボールの速度を確認するより先に動作開始の指令が出されたと考えられる。動作開始前にボール速度が予測よりも遅いことが視覚情報として入力されたとしても、Ff-n 条件の LT である 130 ms の間に動作開始の指令を抑制することは不可能であったのではないかと推測される。

また、Ff-n 条件は実際のボール速度が相対的に遅く感じられる状況であるにもかかわらず、FT も C-n 条件よりやや短縮した。C-f 条件と比較すると、FT と flexion-range がほぼ一致することが明らかになった。これはボールの発射からキャッチまでが約 550 ms という時間の制約が厳しい fast 速度への応答として、肘関節最大屈曲までの動作がオープンループ動作であったことを示唆している。非常に短い時間で遂行される運動は、事前にプログラム化された途中修正の効かない運動 (preprogrammed 動作) とされ、約 200 ms 以内で終了する運動は、その時間内に誤りに気づいても修正が不可能である。C-f 条件および Ff-n 条件における FT は約 240

ms であり、事前に作成されたプログラムの go signal が出されたために、動作を始めてから肘関節を最大屈曲させるまでの間に修正が間に合わなかったと考えられる。

しかし、肘が最大屈曲位に達すると、肘関節は伸展動作へと切り替わる。後半の伸展動作は、実際のボール速度の情報に基づいて修正が加えられている (図 4)。これは、肘関節の屈曲から伸展への切り替わりを境界に、フィードフォワード制御からフィードバック制御へと転換したことを示唆している。この動作の切り替わりは、ボールが発射されてから約 370 ms (LT+FT) 後であり、随意的なタイミングの修正に 300 ms 以上の時間が必要だという Teixeira et al. (2006) の報告を考慮すると、ボール速度が予想していたよりも遅いことに気づいてから修正が加えられる時間としてやや大きい値であった。フィードバック情報による修正が不可能な時間内にプログラム制御による肘の屈曲動作が開始してしまったため、伸展へと切り替わるまで修正の指令が動作に反映されるのが遅れた結果と考えられる。

ボールが手元まで到達する時間はボール速度によって決まっているので、前半の動作が fast 速度を想定して無修正で実行されると、必然的に後半の動作時間が延長する。そこで、C-n 条件よりもキャッチまでの肘の伸展による変位を増加させ、少しでもキャッチまでの時間を短くしようとした結果、後半の動作時間 ET と catching angle が C-n 条件より大きい値となったものと考えられる。本研究では、事前に動作の組み合わせがプランニングされた一連の運動を開始した後でも、屈曲から伸展という明確な動作の切り替わりが存在したため、それ以降の動作を修正することが可能であったのではないかと考えられる。キャッチにおいて約 720 ms (ボール発射からインパクト前の EMG 出現まで約 630 ms) の時間が与えられると、ほぼインパクトのタイミングを予測しなおし、適切なタイミングで最終的な把握動作を開始させることができることが示唆された。

4-4 Fs-n 条件の応答特性

Fs-n 条件では、C-n 条件より動作開始が約 90 ms 遅延した。Slow 速度のボールが来るという予測をもとに、C-n 条件よりもずっと遅いタイミングで動作開始の指令を出すつもりであったため、ボール速度が速くなったことに気づいて準備していた動作のタイミングを修正した結果、C-n 条件よりも動作開始が遅れたと考えられる。ボール速度が予測と異なることに気づき、すぐに動作を開始したと思われる Fs-n 条件の LT は約 330 ms であり、Teixeira, et al. (2006) の報告とほぼ一致した。この値は C-n 条件より

約 100ms 程度増大したことから、本実験において予測が裏切られた際の動作の脳内での修正に時間を要したものと考えられる。

Fs-n 条件を C-f 条件と比較すると、前半の動作に関わる FT, peak-angle, flexion-range はいずれも C-f 条件とほぼ変わらないという結果が得られた。後半の動作でも ET および catching angle に有意な差はなく、Fs-n 条件と C-f 条件の応答は類似していたといえる。Fs-n 条件は、予測よりも速い速度をキャッチしなければならないため、C-f 条件への応答に近いものになることが想像でき、本研究でその応答特性が確認できた。また Fs-n 条件を C-s 条件と比較すると（どちらも与えられた先行情報は slow 速度であったが）、LT が大きく減少していた。また、Flexion-range は C-s 条件より大きく、肘を大きく屈曲させていたことがわかった。このように前半の応答から C-s 条件と大きく異なったのは、ボール発射から slow 速度に適した動作開始までの時間に、ボール速度が予測よりも速いことに気づき、そのフィードバック情報に基づいて動作を開始したためであると考えられる。Ff-n 条件でみられた完全に予測に基づいた動作ではなく、フィードバック情報によって、それ以前に計画されていた運動プランはすでに破棄され、フィードバック制御が用いられていたことが推測できる。

しかし、Fs-n 条件では extension-range の平均値が 15.8 度であり、コントロール条件の 3 速度よりも有意に大きくなったことから、フィードバック情報に基づいて動作を修正したといっても、normal 速度に最適な動作に修正できたわけではないことが示唆された。つまり、前半の動作の間は単に「速い」ことに気づいて、「とりあえず速く、深く肘を曲げなければ間に合わない」と感じて動作を変更していたことが推測でき、Fs-n 条件のフェイント試行では、それまでの slow 速度から「速くなった」normal 速度を必要以上に速い速度と認識してしまった可能性がある。ただし、動作開始が遅れ、キャッチ動作に使える時間が短くなってしまふことを踏まえると、正確なボール速度を認識する前にとりあえず肘を大きく屈曲させ、キャッチの位置を後退させることでインパクトまでの時間を延ばす戦略は適応的であるといえるだろう。

では、予測と異なる速度であることに気づいたあと、正しいインパクトのタイミングを判断したのはいつだろうか。ボール発射後約 550 ms 後の屈曲動作終了までは normal 速度に合わせた動作になっていないこと、ボール発射後約 630 ms 後に最終的な把握動作の筋放電が開始したことから、ボール発射後約 550 ms～630 ms の間

に正確なインパクトのタイミングの予測が立て直されたのではないかと推測される。

4-5 ボールの把握動作

本研究ではボールの確認後、肘の屈曲動作を起こし、伸展動作に切り換え、伸展中に把握動作を実行するという一連の運動によってキャッチが遂行された。

オープンループ型の動作であるキャッチの最終局面に関して、Tijtgat et al. (2010) の研究では、ボール速度に関わらず拇指・示指間の間隔がインパクトの約 60 ms 前に最大となり、キャッチのための最終的な把握動作の時間を一定にする戦略が用いられることが報告されている。本研究においては、把握動作による指屈筋群の筋活動開始がボール速度に関わらずインパクトの約 90 ms 前後となり、彼らの見解を支持するものであった。インパクトの 100～200 ms 前に筋放電が現れたという Lacquaniti and Maioli (1989a) の報告や、ボールを落下させる高さによってインパクト前の筋活動開始のタイミングに変化がなかったという Vishton et al. (2010) の報告とも一致した。

途中の動作が変化しても最終的なキャッチの成否は、ボールが手と接触する瞬間にボールをつかめるかどうかにかかっている。つまり、ボールキャッチにおいてはこの把握動作を適切なタイミングに開始することが最も重要であり、被験者は先行情報をもとにボール速度を予測したり、発射されたボール速度のフィードバック情報を得てから肘関節の屈曲、伸展動作を調整したりすることで、把握動作を開始するタイミングの正確性を高めていたのではないかと考えられる。

本研究では、フェイント条件によって予測が裏切られた場合、予測に基づいて動作を開始した後、フィードバック情報に基づいて最終局面のプログラム開始のタイミングを再計算したと考えられる。予測によって事前に計画された一連の運動（運動プラン）を開始した後であっても、ボールの動きを目で追い、ボール速度に関する視覚情報を、インパクトのタイミングを計算する手掛かりとして利用することはできる。フェイント条件においてもキャッチ成功率が約 90%であったことから、予測と異なるボール速度であることを認知してから最終的なキャッチの指令が出されるまでに、ほぼ最適なタイミングを判断できることが分かった。事前の予測より速くなろうと遅くなろうと、約 720 ms (normal 速度でのボール発射からキャッチまでに要した時間) という時間があれば、視覚情報をもとに到達タイミングの予測を修正し、キャッチ動作を遂行できると言うことができる。

5. 結論

本研究では、ボール速度の先行情報による予測が、キャッチ動作に与える影響について検討を加え、以下のような結果が得られた。

- (1) 速いボール速度の先行情報を与えると、ボール発射から約 370 ms 間の肘関節最大屈曲までの応答は速いボール速度への応答と変わらず、その後の肘の伸展動作において動作時間および伸展角度が大幅に増加した。
- (2) 遅いボール速度の先行情報を与えると、動作開始にはボール発射から約 330 ms 必要であり、正確な予測のもとでの応答と比べると動作開始は大きく遅延し、動作自体はより素早く大きいものとなった。
- (3) 最終的な把握動作の筋活動は、先行情報および実際のボール速度によらず、インパクトの約 90 ms 前に開始した。
- (4) 誤った先行情報による予測に基づいて動作を開始しても、ボール発射からインパクトまで約 720ms の時間が与えられると把握動作のタイミングを正しく修正できることが明らかとなった。

6. 引用文献

- D'Andola, M., Cesqui, B., Portone, A., Fernandez, L., Lacquaniti, F., & d'Avella, A. (2013) Spatio-temporal characteristics of muscle patterns for ball catching. *Front Computer Neuroscience*, 7:article107
- Lacquaniti, F. & Maioli, C. (1989a) The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *Journal of Neuroscience*, 9(1):134-148.
- Lacquaniti, F. & Maioli, C. (1989b) Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, 9(1):149-159.
- Mazyn, L.I.N., Savelsbergh, G.J.P., & Montagne, G. (2007) Planning and on-line control of catching as a function of perceptual-motor constraints. *Acta Psychologica*, 126:59-78.
- 中本浩揮, 森司朗 (2008) 速度変化状況での一致タイミング課題における野球の熟達と運動修正との関係. *体育学研究*, 53 : 39-50.
- 大築立志 (1988) 「たくみ」の科学. 朝倉書店 : pp.78-81.
- 大築立志 (1998) 予測とタイミングからみたヒトの随意運動制御. *体育学研究*, 43 : 137-149.
- Teixeira, L.A., Chua, R., Nagelkerke, P., & Franks, I.M. (2006) Reprogramming of interceptive actions: time course of temporal corrections for unexpected target velocity change. *Journal of Motor Behavior*, 38:467-477.
- Tijtgat, P., Bennett, S.J., Savelsbergh, G.J.P., De Clercq, D., & Matthieu, L. (2010) Advance knowledge effects on kinematics of one-handed catching. *Experimental Brain Research*, 201:875-884.
- Van de Kamp, C., Bongers, R.M., & Zaal, F.T.J.M. (2012) A common first-order time-to-contact based control of hand-closure initiation in catching and grasping. *Human Movement Science*, 31:529-540.
- Vishton, P.M., Reardon, K.M., & Stevens, J.A. (2010) Timing of anticipatory muscle tensing control: responses before and after expected impact. *Experimental Brain Research*, 202:661-667.
- 矢作晋・笠井達哉 (1999) 予測的外乱負荷に伴う運動調節機構の応答性. *経済科学研究*, 2 : 105-115.