

# 投射速度が捕球行動に及ぼす影響と重力認知との関連について

森 司朗\*, 中本浩揮\*, 幾留沙智\*, 畝中智志\*\*, 布野泰志\*\*\*, 竹内竜也\*\*\*, 小笠希将\*\*\*

Shiro MORI, Hiroki NAKAMOTO, Sachi IKUDOME, Satoshi UNENAKA, Taishi FUNO,  
Tatsuya TAKEUCHI, Kishou OGASA

## 要 約

投射速度が捕球行動に与える影響と重力認知との関連について、男子大学生を対象に2つの実験を行った。第1実験では投射速度と捕球行動の関連を明らかにするために、投射速度によって異なる位置（前：11.7m/sec, 真中：12.5m/sec, 後：13.6m/sec）にランダムに落下してくるボールの捕球時の動作開始時間と投射速度および頭部の動きと投射速度とのそれぞれのコーディネーションを検討した。その結果、3つの投射速度間で動作開始時間に有意な差は認められず、また、投射後約0.2secまでは投射速度間で頭部の動きに違いは認められなかった。第2実験では、重力認知の違いが捕球行動に影響しているかを明らかにするために、異なる重力（0.5G, 1G, 2G）で落下してくる刺激に対する一致タイミング課題と動作開始時間及び頭部の動き（上下の動きの角度幅）の関連に関して検討を行った。その結果、頭部の動きの最大角度変位幅と1Gの一致タイミングの絶対誤差との間にのみ有意な正の相関が認められ、恒常誤差に関しては1Gと2Gで負の相関の傾向が認められた。このことから、大学生に関しては、投射速度ではなく自然落下の重力（1G）に順応して捕球動作を開始していることが示唆された。

## **The association between the effect of projection speed on catching behavior and gravity recognition**

Two experiments were conducted with the aim of evaluating the relationship between the recognition of gravity and the effect of projection speed on catching action in male university students. In the first experiment, to identify the relationship between projection speed and catching action, an analysis was made of projection speed and head movement, and of projection speed and the time when movement was initiated, when catching a ball dropping randomly in positions depending on projection speed (front: 11.7 m/sec; middle: 12.5 m/sec; rear: 13.6 m/sec). The coordination of each action was also analyzed. The results did not show any significant difference in the time when movement was initiated for the three different projection speeds. Additionally, up until approximately 0.2 sec after projection, no difference in head motion was observed across the projection speed range.

In the second experiment, in order to identify whether differences in awareness of gravity affect catching action, an analysis was made of the relationships between consistent timing in response to a stimulus dropping at different gravities (0.5G, 1G and 2G) and head movement (angular range of vertical movement) and the time at which movement was initiated. The results showed a significant positive correlation between the maximum angular displacement range of vertical movement of the head and absolute error in constant timing at 1G only, and a significant tendency for negative correlation regarding constant error at 1G and 2G. Thus, for male university students, this suggests that initiation of catching movement is adapted to objects falling under normal gravity (1G) rather than to projection speed.

---

\* 鹿屋体育大学スポーツ人文・応用社会科学系

\*\* 杏林大学医学部統合生理学教室・プロジェクト研究員

\*\*\* 鹿屋体育大学大学院博士後期課程

## I はじめに

我々は通常、捕球や打球というような運動技能の学習を重力のかかった状態で行っている。実際、人間行動のさまざまなレベルでの重力の役割については、これまで多くの研究で報告されている (e.g., Lipshits & McIntyre 1999; Lipshits et al., 2005; McIntyre & Lipshits, 2008; Zago & Lacquaniti, 2005)。具体的には、落下するボールを捕球する場合は、接近する対象が到達するまでの時間を評価するために、重力の情報が必要となる。このことを強く支持する研究として、McIntyre et al (2001) は、無重力の宇宙空間でのキャッチボールは地上で行うキャッチボールよりも難しいことを報告し、脳は対象物の加速（重力）も計算に入れて対象物の動きを予測していると指摘している。つまり、落下するボールは地上では重力によって加速するが、宇宙では無重力のため一定速度のままであるため、捕球が困難になるということである。以上のように、地上では前庭器官や筋感覚情報、視覚情報などから脳が重力に基づく加速を前提にボールの位置を予測して腕を動かしてしまうが、宇宙では重力がないため捕球のタイミングにずれが生じると考えられている。

重力に基づき対象物の動きを予測するものは重力の内的（部）モデルと呼ばれており、Zago & Lacquaniti (2005) は、落下してくる対象のインターセプトにおける視知覚と重力の内的モデルの役割に関して研究のレビューを行い、その重要性を指摘している。この視点に立って、Mori et al. (2010) は、捕球のようなインターセプト運動の技能の習熟と重力認知との関連に関して研究を行っている。彼らは、運動技能獲得の際に物体の自然落下の知覚経験を過剰にしている熟練者は、知覚経験が少ない未熟練者や児童期の子どもたちと比べて、落下刺激に対する一致タイミングの調整が優れていたことを明らかにしている。さらに、落下刺激に対するタイミング調整は、自然落下とは異なる落下速度に比べて、自然落下の重力に基づく速度においてもっとも効果的なタイミン

グ調整が行われていることも明らかにしている。すなわち、落下する対象物に対する一致タイミング課題では、重力認知と運動技能の習熟に関連があったことを示し、この結果は、運動学習における知覚情報としての重力の学習の重要性を示唆している。また、Nakamoto & Mori (2010) は、落下刺激の知覚に対する多感覚情報の利用に着目して検討をおこない、野球熟練者は落下刺激を追従する際の頸部の動きを拘束した際にタイミング誤差が増大し、初級者では拘束によって誤差が増大しなかったことから、熟練者は視覚情報だけでなく、前庭感覚情報を含む多感覚情報によって、落下刺激に対する一致タイミングを行っている可能性を指摘している。前庭感覚情報は重力の認知に関わることから、この研究は熟練者が頸部と眼球運動のコーディネーションを利用して重力などの認知を行っている可能性を示唆する。これらの研究から、落下刺激に対するタイミング調整には重力が重要な知覚情報の役割を果たしていること、またその学習には単なる視覚情報の学習だけでなく、頸部や眼球の動きを利用して多感覚情報を学習する必要があることが示唆される。

このように、落下刺激に対するインターセプトの運動の習熟に伴い身体全体を通したダイナミックな多感覚情報の統合によって重力認知が行われている可能性が考えられる。しかしながら、これまでの実験室的な研究では、実際場面での身体全体を使って捉えた重力認知の特徴を捉え切れていない可能性がある。その理由として、熟練者と未熟練者との差は、実験室より現実的な世界に近いほど大きくなることが指摘されており、現実に近い環境において未熟練者よりも熟練者の方が知覚システムの適応力や修正能力が優れている (Ripol & Latiri, 1997) ことが報告されている。その意味でより、現実世界に近い状況で重力認知の影響を調べる必要がある。

本研究では、落下速度が捕球行動に与える影響について重力認知との関連について明らかにするために、男子大学生を対象に2つの実験を行っ

た。捕球行動に関しては、同一の投射角度では投射速度が速いほど落下開始地点が高くなり、落下位置が異なるとともに、落下速度が速くなるため、投射速度の違いによって捕球行動に違いがみられる可能性が考えられる。そこで、第一実験では、落下位置と捕球行動の関連を明らかにするために、異なる速度で投射された時の動作開始時間および頭部の動きについて検討した。第二実験では、重力認知の違いが捕球開始行動に影響しているかを明らかにするために、異なる重力加速度で落下してくる刺激に対する一致タイミング課題と捕球課題における動作開始時間及び頭部の動きとの関連に関して検討を行った。

## Ⅱ 方 法

### 2.1 実験参加者

捕球動作が習熟している健常な男子大学生10名を実験参加者とした。全実験参加者には、実験の目的および方法を説明した後に、参加の同意を得た。

### 2.2 実験課題及び条件

本研究では、投射機から投射されるボールを捕球する課題（図1）と垂直に落下してくるLEDの光が目標（一番下）に到着する瞬間にボタンを押す一致タイミング課題（図2）の2つを行った。

#### 1) 捕球課題

実験参加者は、3つの異なる初速度（13.6m/sec, 12.4m/sec, 11.7m/sec）で放出され落下してくる直径7.5cmのボールを両手で捕球する課題を行った。本研究では、投射機から12.0mの位置の実験参加者に対して、ボールがその位置に落下する速度、その位置よりも前方に落下する速度、その位置の頭上を越える速度の3つの速度を設定するために、予備実験を行い、以下の3つの位置に落下する落下位置と投射速度を決定した（図1）。

- ①ボール投射機から13.5m（頭上を越えるように設定（投射速度13.6m/sec）：後）

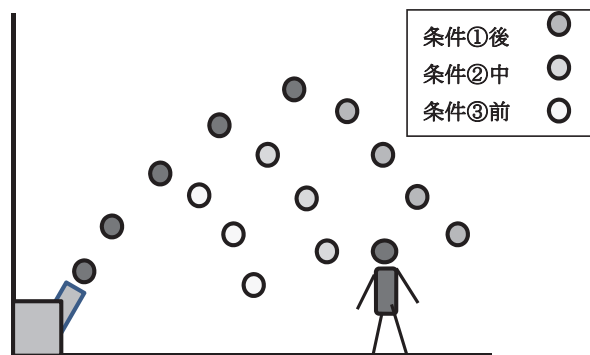


図1 捕球課題

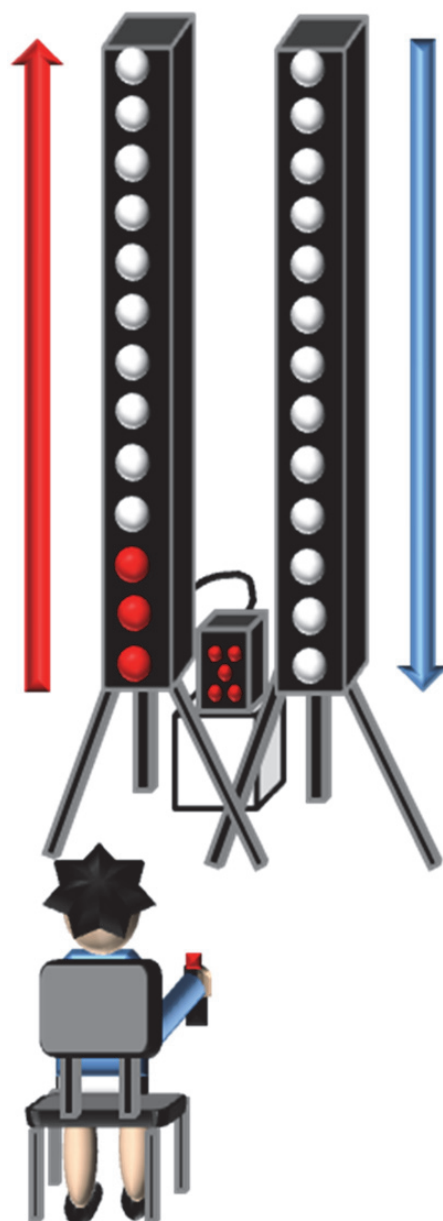


図2 一致タイミング課題

- ②ボール投射機から12.0m（ほぼ移動せずに捕球できるように設定（投射速度12.4m/sec）：中）
- ③ボール投射機から10.5m（目の前に落下してくるように設定（投射速度11.7m/sec）：前）

## 2) 垂直落下の一致タイミング課題

この課題は、垂直落下の一致タイミング課題を用いた先行研究（Mori & Nakamoto, 2010）を参考に設定された。実験装置は2mのレールに取り付けられたLEDに沿って（光刺激）が垂直に上昇方向に移動し、最高点に到達すると隣接する2mのレール上を垂直に落下する装置である（図2）。実験参加者は、8m/secで垂直に上昇し、隣のレール上を自然落下（1G）、自然落下の1/2（0.5G）、または自然落下の2倍（2G）の3つ速度のうちどれか一つの速度で落下してくるレールの最終点に到達したときにボタンを押すことを要求された。

## 2.3 手続き

捕球課題に関しては、風などの自然の影響を受けない屋内の体育館で行った。課題は、投射機から12mの位置に投射機に向き合うように実験参加者を立たせ、「投射機から出てくるボールを捕球してください」という教示を与えた。1投射ごとに開始の合図をだした後に、投射機から各条件でボールを投射し、ボールを基本的には両手で捕球させた。捕球後は、動作開始位置に戻るよう教示した。課題に慣れさせるため、2-3試行の練習試行（開始位置で捕球できる条件）を行った後に、各条件10球ずつの合計30試行のテスト試行をランダムな順序で行った。なお、捕球体勢に入った後にキャッチミスをして落下した場合はデータとして含めた。

一致タイミング課題に関しては、実験参加者はボタンスイッチを利き手で握り、移動指標の到達位置から1.7mの位置にレールに向き合うようにして座位姿勢をとった。実験課題を教示した後、練習試行として落下時の重力加速度が異なる

0.5G, 1G, 2Gの3条件をランダムに1回ずつ練習させた。次に、テスト試行として、落下時の重力加速度が異なる3条件を10試行ずつ、合計30試行をランダムな順序で呈示した。なお、テスト試行では垂直方向に上昇するレール上のLEDを実験参加者が見ているかを確認するため、キャッチタスク（上昇するLEDが最高点まで到達したかどうかを参加者に回答させる課題）を5試行導入した。

また、頭部の動きに関しては、「捕球課題」において、額の中央に小型の9軸のジャイロセンサー（STT-IBS inertial sensor TT Engineering and systems 社製）を固定し、ボール投射後のボールの軌道を追う頭部の動き（最大角度変位幅）を測定した。

## 2.4 測定項目

行動測定に関して、高精度3D運動計測装置（Optotrak：NDI社製）を用いて、胸部の中心（心臓付近）にセンサーを固定し、ボールが投射されてから動き出すまでの時間を動作開始時間、動作開始からボールを捕球するまでの移動速度を捕球追跡速度として抽出した。なお、動作開始は、ボール投射後、0.1m/secで動いた時点と定義した。また、頭部の動きに関しては、額の中央に小型の9軸のジャイロセンサー（STT-IBS inertial sensor TT Engineering and systems 社製）を固定し、正面をまっすぐに見ている状態を0度として、そこを中心に頭部の上（プラス）下（マイナス）の動きとした。

垂直落下の一致タイミング課題の正確性と恒常性を検討するために、目標からの誤差の大きさを表すAE（Absolute Error: 移動指標到達からの絶対誤差）、パフォーマンスの歪みを表すCE（Constant Error: 個人内の恒常誤差）の2つの指標を分析対象とした。

## 2.5 統計処理

動作開始時間に関しては、投射速度の条件間で繰り返しありの一要因の分散分析を行った。ま



た, 捕球追跡速度および頭部の動きに関しては, 投射速度×経過時間の繰り返しありの2要因の分散分析を行い, 事後検定には Bonferroni の多重比較を行った。さらに, 垂直方向の一致タイミング誤差の絶対誤差と恒常誤差それぞれに関して, 動作開始時間および投射時点での頭部の動きとの関係を明らかにするためにピアソンの相関係数を算出した。

## Ⅲ 結 果

### 3.1 動作開始時間に関して

図3は, ボールの各落下位置における動作開始時間を示している。各落下位置間で動作開始時間に違いが示されるかどうか明らかにするために, 動作開始時間に関して, 繰り返しありの1要因の分散分析を行った結果, 有意差が認められた ( $F(2,18) = 3.717, p < .05, \eta^2 = 0.292$ )。しかしながら Bonferroni の多重比較を行った結果, 有意な結果は示されず, 動作開始時間に関しては落下位置の影響を受けていないことが明らかとなった。

### 3.2 捕球追跡速度

各落下位置における捕球追跡速度の0.2秒ごとの変化を示したのが図4である。これより, ボール投射後0.6秒後から, ボール落下位置が, ほぼ移動せずに捕球できるように設定された落下位置「中」が他の条件に比べて速度が遅いことが示された。そこで, 捕球追跡速度に関して, 落下位置 (3) × 経過時間 (7) の繰り返しありの2要因の分散分析を行った。その結果, 落下位置 ( $F(2,16) = 46.66, p < .01, \eta^2 = 0.85$ ) および経過時間 ( $F(2,2, 7.8) = 96.00, p < .001, \eta^2 = 0.92$ ) で有意な主効果が認められた。そこで Bonferroni の多重比較をおこなった結果, 落下位置に関しては, 中と前 ( $p < .005$ ) および中と後 ( $p < .001$ ) のそれぞれ間に有意な差が認められ, また, 経過時間に関しては, 投射後1.2から1.4秒と1.5から1.7秒の間以外は各経過時間で有意な差が認められた ( $p < .05$ )。さらに, 有意な交互作用が認められた ( $F(12,96) =$

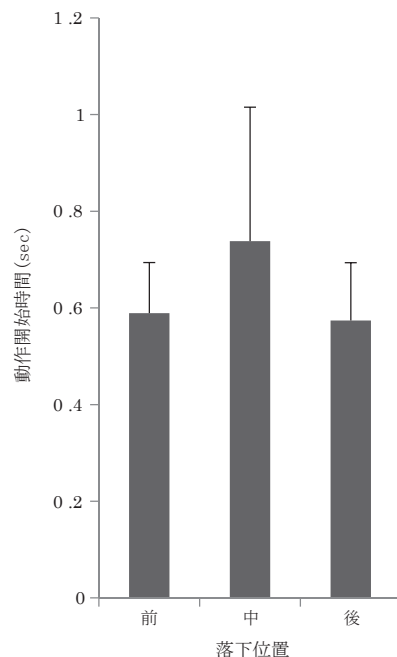


図3 各落下位置の動作開始時間

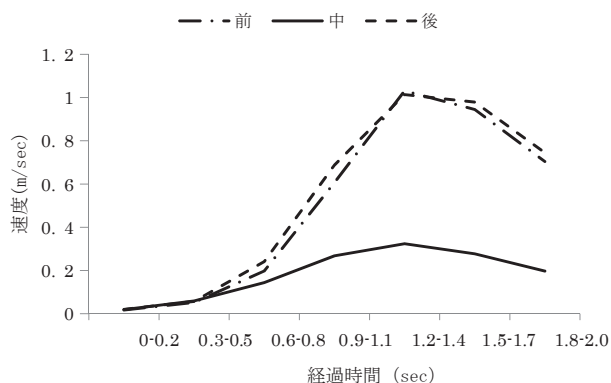


図4 各落下位置の時間経過に基づく捕球追跡速度の変化

21.90,  $p < .001, \eta^2 = 0.73$ ) ので, 速度経過ごとに単純主効果検定を行った。その結果, 投射後0.6-0.8秒以降において, 落下位置前と中の間に, 0.9-0.11秒以降において, 落下位置中と後の間で有意な差が確認された ( $p < .05$ )。しかしながら, 落下位置前方と後方の間には追跡速度に差は認められなかった。

### 3.3 投射後の頭部の動き(上下の最大角度変位幅)

投射後の頭部の動きを示したのが図5である。図4の結果と合わせると, 捕球するために移動を開始する時間より早く頭部が動き始めていたことがわかる。また, 移動しなくて捕球できる場合

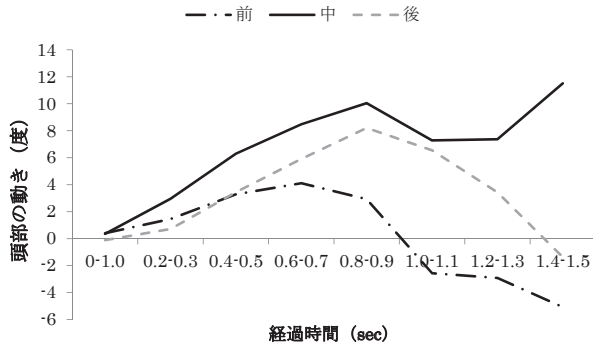


図5 各落下位置の時間経過に基づく頭部の動きの変化

(中), 最も頭部の上下の角度が大きかった。そこで, 頭部の動きに関して落下位置 (3) × 時間経過 (8) の繰り返しありの2要因の分散分析を行ったが, 全ての主効果と交互作用に関して有意な結果は示されなかった。このことから, 捕球行動にかかわる頭部の動きは投射速度の影響を受けていなかったことが示唆された。

### 3.4 一致タイミング誤差と動作開始時間との関係

自然落下 (重力; 1G) を基準としたタイミング能力が捕球動作開始に影響を与えるかを検討するため, 垂直方向の一致タイミング課題における絶対誤差と恒常誤差の2つのタイミング誤差と捕球動作の動作開始平均時間との関連を示したのが図6である。動作開始時間と垂直方向の一致タイミング誤差の絶対誤差と恒常誤差それぞれに関してピアソンの相関係数を求めた結果, 絶対誤差に関しては, 1Gの一致タイミングと動作開始時間には正の相関 ( $r=0.521$ ) が示されたが, 有意ではなかった。一方, 恒常誤差に関しては, 動作開始時間の平均と1Gの一致タイミングとの間には0.5G ( $r=-0.397$ ) と1.0G ( $r=-0.325$ ) で負の相関は示されたが有意ではなかった。

### 3.5 一致タイミング誤差と投射時点での頭部の動きとの関係

自然落下を基準としたタイミング能力が捕球動作時点での頭部の動きに影響を与えるかを検討するため, 垂直方向の一致タイミング課題における絶対誤差と恒常誤差の2つのタイミング誤差と投

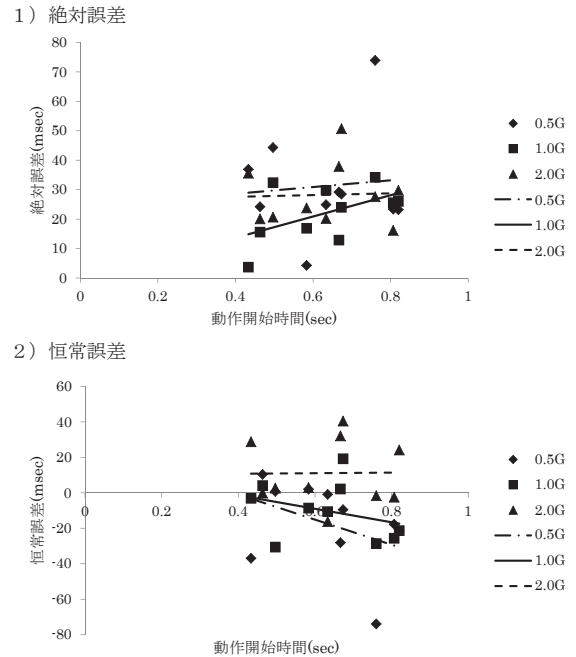


図6 一致タイミング誤差と動作開始時間との相関関係

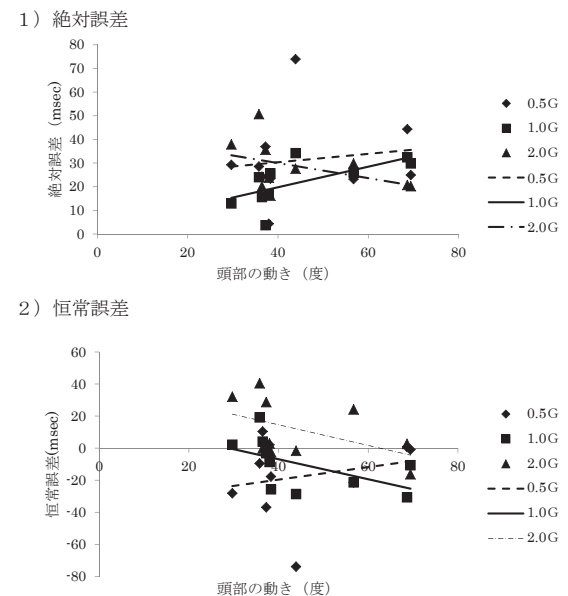


図7 一致タイミング誤差と投射時点での頭部の動きとの関係

射直後の頭部の上下の最大角度変位幅との関連を検討した (図7)。両者の関連についてピアソンの相関係数を求めたところ, 絶対誤差に関しては頭部の最大角度変位幅と1Gの一致タイミングとの間の関連に関しては有意な正の相関 ( $r=0.644$ ,  $p<.05$ ) が認められた。また, 有意ではなかったが, 2G ( $r=-0.431$ ) で負の相関が示された。恒常誤差に関しては, 頭部の動きの平均角度と一致タイミングとの間に1G ( $r=-0.548$ ,  $.01<p<.05$ ) と2G

( $r=-0.493$ ,  $0.1 < p < .05$ ) で有意な負の相関の傾向が認められた。

#### Ⅳ 考 察

本研究では、投射速度が捕球行動に与える影響について重力認知との関連について明らかにするために2つの実験を行った。第一実験では、投射速度と捕球行動の関連に関して、異なる速度で投射された時の動作開始時間、追跡速度および頭部の動きを検討した。その結果、動作開始時間は投射速度の影響を受けず、捕球追跡速度に関しては、動作開始から落下位置条件ごとに捕球追従速度に違いが見られた。また、投射直後の頭部の動きに関しても、移動を開始するより早く頭部が動き始めていた。また、移動して捕球する場合より、移動せずに捕球する場合のほうが、頭部の上下の最大角度変位幅が大きかった。

次に、第二実験では、重力認知の違いが捕球開始行動に影響しているかを明らかにするために、異なる重力加速度で落下してくる刺激に対する一致タイミングパフォーマンスと動作開始時間及び頭部の動きの関連に関して検討を行った。その結果、動作開始に関しては、今回の研究では有意な相関は認められなかった。しかしながら、1Gのタイミングの絶対誤差が小さい（重力を正しく認知）実験参加者ほど、捕球動作を開始する時間が早くなっており、動作開始時には捕球のための動作方向を即座に判断していた可能性が示唆された。また、恒常誤差に関しては、1Gと0.5G条件の一致タイミングの恒常誤差がマイナスになっており、尚早反応的になっていることが明らかになった。この点は、自然落下の重力である1Gと0.5Gにおいては、投射直後の動作開始が早い実験参加者ほど一致タイミング課題において前もって重力による自然落下の知覚に基づいて行動していたことを示している。

また、一致タイミング課題と頭部の動きの関連に関しては、絶対誤差では、1Gの課題が正確にできる人ほど投射直後の頭部の上下の最大角度変

位幅が小さくなっていた。理由として、動作開始時点ですでに視覚による捕球に関する情報の選択範囲が絞られていたために、頭部の移動範囲が狭められていた可能性が考えられる。また恒常誤差に関して、1Gと2Gで尚早反応を示す実験参加者は動作開始直後の頭部の動きが大きかった。これより、自然落下の重力認知がうまくいかない実験参加者は、捕球開始時点でも視覚を使って捕球するための情報を幅広く探していたと考えられる。以上の点を踏まえると、ボール投射直後に捕球のための落下位置に関する情報を早い段階で選択する実験参加者ほど、自然落下の重力1Gのタイミングに関して習熟しており、そのため、投射開始直前の情報収集に関して、前もって重力の内的モデルに基づき投射時点で落下地点を予測し、その結果より効果的な視覚探索をしていたことが示唆された。

このように、捕球動作が習熟している大学生は、捕球動作に重力認知の影響を受け、捕球動作を開始し調整していることが示唆され、捕球するための重力に関する内的モデルが組み込まれている可能性が考えられた。Zago & Lacquaniti (2005) は視知覚と落下してくる物体のインターセプトに関して重力の内的モデルの重要性を指摘しており、今回の研究でも捕球開始前にすでに重力に関する内的モデルを有しており、そのモデルを持って運動を開始しているので、投射時点の早い段階で捕球動作を開始できたと考えられる。しかしながら、この点に関しては、内的モデルというより、Baurés et al. (2007) が指摘するような重力の効果の質的暗黙の知識のような投射速度そのものの知覚弁別の精度（能力）が捕球動作の遅速に影響していたという可能性も考えられる。この点については、今後さらに検討していく必要がある。

今回の研究では、人間が運動技能で何を学習しているかということに関して、重力という点に視点を絞って研究を進めてきた。この点については、知覚と運動の時間的な遅れの問題が学習における重力の意味を考える上で重要になってく

る。これまでの研究から (ex., Njhawan, 2008) 人間の行動における視覚一運動の遅れについては 150–200ms かかることが報告されており, さらに, ターゲット速度の変化に対する運動反応の調整には, 約200ms かかることも報告されている (Brenner et al., 1997)。本研究においては, 動作開始にはおよそ500ms 以上がかかっているが, 投射後の頭部の動きは200ms 付近から, どの投射速度に関わらず動き始めていることが示されていた。このことは, 今回の実験の対象者である大学生においては, この捕球動作開始後の200ms という時間の間に, 捕球するための重力についての暗黙の知識が組み込まれた予測モデルが使われ, 時間的な遅れを補おうとしていた可能性が考えられる。この組み込みの過程が運動技能の習得であり, Shadmant & Mussa-Ivaldi (1994) が指摘しているように, 運動学習のパラダイムにおいて, 捕球の練習は典型的に内的モデルへの順応によって捕球ができるようになるという学習後の効果を示している。また, Zago et al. (2008) は過去20年間で重力が自由落下のボールの捕球において考慮されてきたことを報告しており, このことを踏まえた場合, 捕球動作が習熟している大学生においては, 重力のモデルに順応して捕球が行われたと考えられる。

以上のことより, 落下に対するタイミング調整には重力が学習のための重要な知覚情報の役割をしていることが明らかにされた。しかしながら, 今回の研究は物体が落下する点に着目して研究を進めたが, 重力そのものは物体が上がる時も落下する時も全て重力の影響を受けている。本研究の目的がより実験室と現場との知見を類似させるということを視点に当てていることを考慮すると, 今後物体が上昇する場合に関しても考慮して研究を進めていく必要がある。

#### 付記

本研究は, 平成23–26年度科学研究費補助金基盤研究(C)「運動学習に影響を及ぼす動認知・習

得過程に関する発達の検討」による一部である。

#### 引用文献

- 1) Baurés, Benguigui, N., Amorim, M-A. and Siegler, I. A. (2007) Intercepting free falling objects: Better use Occam's razor than internalize Newton's Law. *Vision Research*, 47: 2982-2991.
- 2) Brenner, E., Smeets, J. B., and lusaanet, M. H. (1998) Hitting moving targets. Continuous control of the acceleration of the hand on the basis of the target's velocity. *Experimental Brain Research*, 122: 467-474.
- 3) Lipshits, M. and McIntyre, J. (1999) Gravity affects the preferred vertical and horizontal in visual perception of orientation. *NeuroReport*: 10, 1085-1089.
- 4) Lipshits, M., Bengoetxea, A., Cheron, G. and McIntyre, J. (2005) Two reference frames for visual perception in two gravity conditions. *Perception*, 34: 545-555.
- 5) McIntyre J., Zago, M., Berthoz., A. and Lacquaniti, F. (2001) Does the brain model Newton's laws? *Nature neuroscience*, 4: 693-694.
- 6) McIntyre, J. and Lipshits, M. (2008) Central process amplify and transform anisotropies of the visual system in a test of visual-haptic coordination. *The Journal of Neuroscience*, 28 (5): 1246-1261.
- 7) Mori, S., Nakamoto, H. and Mizuochi, H. (2010) The developmental difference between children and adults with regard to the movement timing correction to an unexpected change in falling velocity, 2010 NASPSA Conference.
- 8) Nakamoto, H. and Mori, S. (2010) The role of multisensory information in estimating the landing time of a flying ball, 2010 NASPSA Conference.
- 9) Njhawan, R. (2008) Visual prediction:



Psychophysics and neurophysiology of compensation for time delays. *Behavioral and Brain Science*, 31: 179-239.

- 10) Ripol, H. and Latiri, I. (1997) Effect of expertise on coincident-timing accuracy in a fast ball game on coincident-timing accuracy. *Journal of Sport Sciences*, 15: 573-580.
- 11) Shadmehr, R. and Mussa-Ivaldi, F. A. (1994) Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, 14 (5): 3208-3224.
- 12) Zago, M. and Lacquaniti, F. (2005) Visual perception and interception of falling objects: A review of evidence for an internal model of gravity. *Journal of Neural Engineering*, 2: S198-S208.
- 13) Zago, M., McIntyre, J., Senot, P. and Lacquaniti, F. (2008) Internal models and prediction of visual gravitational motion. *Vision Research*, 48: 1523-1538.