

博士論文

エコロジカル・アプローチによる熟達化研究
：わざの成立を支える知覚的制御

2015年3月

東京大学大学院学際情報学府

097201

伊藤 万利子

目次

序	1
1 章 研究の背景	2
1.1 知の働きの検討：熟達化研究における知識観	2
1.2 エコロジカル・アプローチと熟達化	13
2 章 ふりけんにおけるけん玉初心者群と熟練者群の姿勢制御	38
2.1 実験 1 方法	43
2.2 実験 1 結果	53
2.3 実験 1 考察	43
3 章 視環境制約下でのけん玉熟練者における視覚を調整する運動の変化とその学習	89
3.1 実験 2 方法	91
3.2 実験 2 結果	98
3.3 実験 2 考察	146
4 章 総合考察	154
文献	165

序

身体にみる知性：けん玉における巧みなふるまい

19 世紀に科学的心理学が成立する以前から、心の知的な側面に対して関心がもたれてきた。知性の捉え方は様々になされると考えられるが、認知心理学が成立して以降の心理学では、心を情報処理過程として捉え、脳内モデルを仮定して知のはたらきを説明してきた。一方で、Polanyi(1966)などによる身体的な知識の重要性への指摘から約半世紀が経過し、また、80 年代後半以降のロボティクス分野を中心とした身体性の再評価(Brooks, 1986, 1991)などにより、身体の動きに認識や知性の働きをみることは認知科学で広く受け入れられるようになった。近年、この身体の知を明らかにする上で、スポーツや楽器演奏、古典芸能などの「わざ」を実行する身体を科学的に分析し、動作のこつを明らかにする試みが行われている。本研究では、「わざ」としてのけん玉操作を事例とし、けん玉熟練者の身体運動を分析する。「わざ」としてのけん玉のこつに迫ることで、認知科学の諸領域で検討されている知の働きの一端を、身体—環境系のふるまいを重視する側から明らかにすることを試みる。

本論文では、まず、知の働きが検討されてきた認知科学領域での熟達化研究を概観し、脳内活動のみを知性と考える従来の知識観に対し、身体—環境系のふるまいを知性と考える立場を紹介する。その上で、後者の立場をとるエコロジカル・アプローチ(Gibson, 1979)の視点を導入し、けん玉の実行を支えるために必要な身体技法について説明をしていく。本研究では、熟達化において、環境の知覚情報を探索する身体が重視され、情報を視覚探索する身体が「わざ」の成功にどのように寄与するのかが示される。

1 章 研究の背景

1.1 知の働きの検討：熟達化研究における知識観

熟達とは、“ある特定の段階において、長期の経験や練習を積むことで獲得した、その領域に固有の、豊富な知識や熟練した技能の段階(松為, 2007 p.394)”である。熟達化とは、初心者から熟達者への発達的变化を指す(安藤, 2005)。熟達者・熟練者という用語は、芸術、伝統芸能・工芸、スポーツ、ゲーム等の分野で優れたパフォーマンスを示す者に対して使われる用語である。一方で、日常生活を振り返ってみると、わたしたちは、でこぼこした舗装のされていない道で躓かずに歩いたり、こぼさずに食べ物を口に運んだりすることができる。わたしたちはこのような日常のタスクに習熟しており、そのような意味では、わたしたちは様々な分野における熟達者であると意味づけることもできる。しかしながら、熟達について明らかにする際には、初心者との比較をすることになるため、同年齢であればほとんどの人が熟達者であるようなタスクよりは、一部の人がエキスパートとして存在するタスクが研究対象とされてきた(大浦, 1996)

認知科学領域では、人間の知のはたらきを明らかにすることを目標として研究がなされており、熟達化は40年にわたって検討がなされている。認知科学領域で熟達化研究が発展した理由について、大浦(1996)は、二つの理由を挙げ、次のように述べている。

“第一は、個人差の研究で少数の人が示す優れた遂行をそれらの人たちの一般的知能や基礎的な認知・知覚能力の高さあるいは人格特性で説明しようとした試みが十分な成果を上げえなかったこと、第二は、1960年代から1970年代にかけてなされていた問題解決過程の情報処理的研究がめざしていた方向、つまり問題解決過程を情報の入出力、消去、変換、生成などの、基礎的で領域を超えた一般性をもつ処理によっては、人間の問題解決過程を十分に説明できないことが徐々にはっきりしてきたことである(Glaser & Chi, 1988; Ericsson & Smith,

1991). これらはいずれも研究者に従来の一般的な要因や基礎的過程重視の研究の限界を知らせ、課題遂行における領域固有のよく構造化された豊かな知識の果たす役割の重要性に注目させる契機となり、熟達者の知識、技能の研究がさかんになっていったのである(大浦, 1996 p.12)”.

大浦(1996)が指摘している以外にも、特定分野やタスクでの専門的知識を有しており、当該の分野やタスクで最適な情報の利用や、その専門的知識を柔軟な利用ができていると考えられる熟達者の知識を解明することで、教育や学習、工学的な応用に活かすことが可能であると考えられるため、熟達者を対象とする研究がなされてきたということも言えるだろう.

このように、認知科学領域では、特に一部の熟達者が存在するタスクでの熟達者の知に注目し、その知を検討してきたという背景がある。そこで、本研究で知の働きを検討する上で、まず、認知科学領域において熟達化に関する研究がどのように展開されてきたのかを見ていく。

認知主義的熟達化研究

認知科学領域における熟達化の代表的な研究は、チェスの研究(de Groot, 1965; Chase & Simon, 1973 など)であろう。チェスの熟達化という認知科学領域での先駆的な熟達化研究を始めたのは de Groot(1965)であるが、後の熟達化の理論に多大な影響を与えているのは Chase & Simon(1973)である。Chase & Simon(1973)は、すぐれたチェスのパフォーマンスの秘訣は、意味のある駒の位置の構造を知覚し、符号化する能力にあると考え、チェスの熟達化をチャンク理論で説明しようと考えた。Chase & Simon(1973)の研究でのチャンクというのは、チェスのゲームで見られるよく知られたパターンのことを指す。彼らの実験では、チェスの熟練者(マスターレベル)、中級者、初心者という 3 段階

の熟達度のプレーヤーを対象とした。実験では 2 つの実験課題があった。ひとつは知覚課題であり、プレーヤーは隣に並べられたチェス盤の配置に繰り返し視線を向け、できるだけ早く正確にチェス盤の位置をコピーした。もうひとつの課題は短期記憶の再認タスクであり、プレーヤーは 5 秒間駒の位置をみたあとに駒の位置を再生した。両方の実験では、実際のチェスの対局で見られる駒の配置と、ランダムな配置を用いた。データから、より上手なプレーヤーの優れたパフォーマンスはランダムな駒の配置では見られず、実際のチェスの対局で見られる配置にのみ観察された。またこの熟練度による違いは、エキスパートの長期記憶に蓄積された数千のチャンク(パターン化された駒の集まり)に由来するものであると結論付けられた。

この Chase & Simon(1973; Simon & Chase, 1973)によるチャンク理論は、その後、Gobet & Simon(1996)などの研究により改良が提案されている。このようなチェスの研究からは、熟達における選択的探索や、パターン認識、領域固有の知識の重要性が明らかになり、チェス以外での分野の熟達化においても同様の知見が明らかにされてきた(Gobet, 1999 伊藤訳 2012)。

認知科学領域における従来の熟達化研究としては、チェスの研究のほかにも、スポーツや音楽、医学などの分野の研究もある(Ericsson, 1996)。例えばスポーツについては、大浦・後藤(1994)は、剣道を事例として、状況の把握や判断が技の熟達に伴って変わるかどうか、かわるとしたらどの面が変わるのかを検討した。

大浦・後藤(1994)によれば、認知科学領域の熟達化研究では、熟達を明らかにする際に、多くの場合、記憶課題などの知的課題が用いられてきた。一方で、大浦・後藤(1994)が対象とした剣道のようなタスクでは、そのときの相手の運動の変化に応じて、どのように攻撃をするのか、防御をするのかなど、自分のふるまいを決めなければならない。つまり、未知の状況に応じて柔軟に行動することが問題となるのであり、そのようなことに長けていなければ、剣道の熟達者にはなりえないであろう。このように、知識が柔軟で

適応性をもっており、さまざまな条件や制約の変化に効果的に対処しうる者を波多野・稲垣(1983)は「適応的熟達者」と呼んだ。また、波多野・稲垣(1983)は、その技能の遂行の速さ・正確さ・自動性などにおいてのみ他の人より優れており、環境の制約が一定である場合のみ有効な技能をもつ者を適応的熟達者と対比させて「手際のよい熟達者」としている。波多野・稲垣(1983)による熟達者の分類に沿えば、大浦・後藤(1994)が対象とする剣道の熟達者は、適応的熟達者であると考えられる。それにも関わらず、従来の認知科学領域での熟達化研究における記憶課題のような、熟達を直接的に捉えるものではないとも指摘される課題のみを行っていたのでは、剣道領域での熟達は十分には明らかにならないであろう。そこで大浦・後藤(1994)の研究では、熟達化をより直接的に捉えられるように熟達者がその熟達した技能を発揮する実際の場面により近い課題状況を作り、正答が一義的に決まらない非収束的な課題も用いて問題解決を求めた。

彼らの研究では、大学生の剣道の熟達者 9 名、準熟達者 10 名、未経験者 9 名を対象とした。実験では、剣道のルールなどの知識を問う課題や、技が決まる直前の静止画像を見せて勝敗と決まり技を予測させるような定型的な場面での判断を問う課題に加え、剣道の有段者と未経験者の中段の構えの写真を用いて技量を判断させる課題や、技が決まる直前で画面が静止するように編集した試合のビデオを用いてビデオを観終わったあとに試合展開を述べさせ、その試合の主導権がどちらの選手にあったと判断しているのかなど、正答が一義的に決まらない課題も用いて熟達化が調べられた。その結果、剣道の知識に関するテストでは、熟達者と準熟達者の 2 群と初心者群のあいだに差はあったが、熟達者と準熟達者との間に差はなかった。また、勝敗と決まり技の予測テストについては、熟達者と準熟達者との間に差はなく、勝敗の予測テストのみ、その 2 群と初心者との間に差があった。一方、非収束的な課題では、熟達者と準熟達者とのあいだに差があり、構えの写真を用いた技量の判断課題と試合展開を述べる課題では、準熟達者と初心者との間に有意な差はなかった。したがって、定型的な場面での判断は、熟達の早い段階から

正確にできるようになるが、非定形的な場面で正確に判断できるような知識は長期にわたる練習によって形成されていくと結論づけられた。

このように、熟達化研究では、チェスやスポーツなど複数の多様なタスクを対象とし、記憶課題やより状況に応じた課題などを通して、その領域での知識構造が検討されてきたと言えるだろう。しかしながら、認知科学領域における熟達化研究では、ほとんどの場合、熟達化を明らかにする際に問題解決における思考過程が問題とされてきた。これは、認知科学領域における熟達化研究では通常、脳による計算過程が認知なのであり、知性は情報処理過程のなかで成立すると考えられているからであろう。しかしながら、熟達化を明らかにする上では、脳による情報処理のみならず、身体をもつ行為者が相手の行動・環境の変化に応じて実際にどのように行動するのかということも問題となるのではないか。

知性への環境、身体的重要性

知性を身体や環境と切り離された脳の情報処理によって産出されると考える立場は、認知主義と言われる。それに対し、知的なふるまいは身体と環境との自律的な相互作用から生じるという「身体性」(小嶋, 2010 p.518)という概念が 80 年代半ばから強調されるようになり、そのアイディアが中核をなす身体性認知科学(Varela, Thompson, & Rosch, 1991 田中訳 2001)が提唱されるようになった。身体性認知科学が提唱されるようになった背景には、認知主義による人工知能研究でいくつかの問題点が示されたということにある。人工知能研究が始まったのは、1956 年のダートマス会議であるとされている(Gardner, 1985 佐伯・海保訳 1987)。人工知能の古典的なアプローチにおいては、知能はそれを模擬する機械によって正確に表現できるのであり、抽象的な操作として捉えられていた。古典的なアプローチでは、知能とはアルゴリズムあるいはソフトウェアとしてのプログラムであり、それを動かすハードウェアは重要ではなく、アルゴリズム

やプログラムはハードウェアに依存しないとされていた。そのような考えのもと、人工知能研究においては、自然言語プログラムや数学の定理を証明するプログラム、チェスなどのゲームをするプログラム、さらには実世界の問題を解くためのエキスパートプログラムなどが作り出された。その結果、論理をあてはめたり、数学の定理を証明したり、抽象的な問題を解いたり、チェスをしたりするなどの形式論理が問題となるようなタスクの解決が人工知能によってうまくなされることがわかった。同時に、匂いをかぐ、会話する、ご飯を食べるなどの、わたしたちの何気ない動作を古典的アプローチで表現することは難しいことが明らかになった(Pfeifer & Bongard, 2007 細田・石黒訳 2010 p.24-37)。

なぜ古典的な人工知能がわたしたちにとって容易であると考えられるタスクをうまく達成しないのであろうか。その理由のひとつは、特定の状況において人間であれば容易く行為できることに對し、その状況でロボットが問題を解く場合、環境の状態について一つ一つ命題を作らねばならず、その記述が膨大な量になってしまうということにある。これは、「フレーム問題」(McCarthy & Hayes, 1969)と呼ばれる。ロボットが特定の環境の状況に順応し、問題を解こうとすると、ロボットが内部にもつ形式的なモデルを常に更新しなければならず、データの更新に労力がかかる。それゆえ、ロボットの順応能力を形式的なモデルとして表現することは難しい。別の問題は、バラの棘に触れてしまったときの痛み、炭酸水がのどで弾ける感じ、屋外へ出たときの太陽の眩しさなどのような私たちの身体に根ざした知識を人工知能で柔軟に適応的に扱うことが難しいということだ。このような知識は命題的ではなく、記号として表現することがそもそもできないものである。

フレーム問題や身体に根ざした知識の表現の難しさといった問題が生じる主要な原因は、システムと環境との密な相互作用が、知性の前提から欠如していることにある。これらのことをふまえて、知性は身体のない思考・論理ではなく、身体をもつのであり、実

世界との相互作用に注目すべきであるというのが、身体性認知科学の主張である (Pfeifer & Scheier, 1999 石黒・小林・細田訳 2001; Pfeifer & Bongard, 2007 細田・石黒訳 2010 p.24-37).

認知主義では適応的なふるまいを説明するのが困難であることを示しているのは、人工知能研究の文脈においてだけではない。運動研究の文脈においても同様のことが示されている。19世紀初頭の古典的な運動制御理論では、「鍵盤支配型モデル」という理論が主流であった(Tuller, Turvey, Fitch, 1982)。これは、中枢神経システムに貯蔵されている無数のプログラムから今行おうとしている特定のプログラムが検索されて、それにより個々の関節や筋と対応した大脳皮質の「鍵盤」が刺激されて運動器に命令が伝わり運動が成立すると考えるものである。この鍵盤支配モデルで制御されるのは、個々の鍵盤に一対一に対応した筋肉の活動や関節の角度である(三嶋, 2000 p.78-96)。このようなモデルは、脳を中枢とし、身体を中枢によって制御される対象と見なしており、認知主義的なモデルだと言える。このような制御モデルに対し、運動生理学者のBernstein(1967)は疑問を投げかけた。わたしたちの身体は、およそ 10^2 個の関節, 10^3 の筋肉, 10^4 の細胞で構成されており、膨大な数の自由度がある(Turvey, 1990)。自由度とは、“あるシステムの状態を決定づける変数の中で、互いに独立に変化し得る変数の数(工藤, 2003 p. 310)”である。身体を制御するときこれだけの自由度が存在する中で先の鍵盤支配モデルのような制御方法によって身体を制御しようとするれば、指定する運動の状態の数も膨大なものになり、制御が複雑になってしまう。このような多くの自由度をもつ身体をどのように制御するのかというのが自由度問題である。また、運動をする際には、その運動タスクの解決に絶対に必要な要素よりも多くの要素がパフォーマンスに関わっているが、このように、系を定義する変数以上に制御可能な変数が存在する場合、そのタスクの制御における解を一意に決定できない。自由度については、このような冗長な自由度の問題もある(工藤, 2003 p. 310; Latash, Scholz, & Schoner, 2007)。

Bernstein (1967)は、協応によって自由度問題が解決されると考えた。協応とは、“運動期間の冗長な自由度を克服すること、すなわち運動器官を制御可能なシステムへと転換すること(Bernstein, 1996 工藤訳 2003, p.43)”と定義される。Bernstein(1967)は、身体が制御されるときには、身体の要素が個々に制御されるのではなく、身体各部が連携して自由度を減らしているような機能的な構造が形成されると考えたのである。ヒトの協調構造の特徴は、機械との比較で明らかになる。印刷機のような機械は多数の部品で構成されている。短時間で大量に印刷をするだけでなく、部ごとにソートし、綴じることなども可能である。しかしながら、このような機械の自由度は1である。自由度が1の場合、特定の1つの道筋や軌道が形成される。機械はあらかじめ決められたことを行っているのである。一方、ヒトは多自由度の身体をもつ。自由度の冗長性ゆえに、多様な軌道を選ぶことができ、タスクに応じて柔軟に協調構造が形成される(Bernstein, 1996 工藤訳 2003)。Bernstein(1967)による協応構造のアイデアは、現在では、多自由度をもつ身体の制御が自己組織化の原理のもとに成立していると考えられるシナジェティクス(Haken, 1978)の領域で検討されている(三嶋, 2000)。

巧みな動作を実現するロボット

認知主義的なアイデアの問題点が指摘されて以降、知性を検討する研究はどのように行われているのであろうか。研究の事例としては、熟練動作を行うロボット研究を挙げることができる。熟練を要する巧みな動作を行うロボットは様々な種類のものが作られているが、宮本・川人は、見まねによって運動学習を行うけん玉ロボットを作成した(宮本, 1998)。ロボットが学習する際には、ロボット内部の制御変数と環境の状態変数との相互作用が重要になり、それらの変数の表現が問題となる。人がけん玉を行うときの腕の運動軌道から人の運動の特徴を少数の経由点という表現で抽出でき、その抽出した経由点のいくつかを制御変数としてけん玉ロボットに使われた。彼らの作成したけん玉

ロボットは、玉を皿にのせる技を行うものであった。この技では、玉の振り上げ動作に影響する経由点を制御変数とし、玉の上がる向きを状態変数とするタスク表現を行った。その結果、けん玉ロボットは玉を皿にのせる技に成功した。このタスクを 10 回中 2~3 回成功させることができた(宮本, 1998)。ただし、皿に玉をのせる技はけん玉の基本技であり、熟練者であればほとんど失敗しない技である。

近年では、機械の計算能力が向上し、また動力の洗練も相まって、「高速マニピュレーションシステム」(並木, 2013)を用いたロボットが作られている。高速マニピュレーションシステムは感覚系、処理系、運動系の 3 つの要素からなるもので、感覚系と処理系が「反応速度」に、運動系が「運動速度」に関係する。従来、人間の熟達動作のような複雑で巧みな動作を高速で実現するのは難しいとされているが、この高速マニピュレーションシステムを用いて、そうした熟達動作を人間以上の高速性で実現することが目的とされる(並木, 2013)。最近、このシステムを用いて、けん玉ロボットが作られた。このけん玉ロボットは、玉をけんにのせる技を行うことができる。感圧センサーとカメラによって、けんの握り具合やけん先の位置が計測・補正される。また、高速カメラで玉の軌道が計測され、落下位置が予測されて皿で玉を受け止めている。このけん玉ロボットでは、技の成功率は8~9割であるという(日刊工業新聞, 2014)。一方で、繰り返しになるが、けん玉熟練者は、けんを皿にのせる技であれば10割に近い確率で成功させることができる。この差が単に量的なものであるのか、あるいは質的なものに起因するのかを冷静に検証することが、ヒトの巧みさと機械の巧みさの違いを考える上で重要と考えられる。

熟達者の身体運動研究

知性における身体や環境の重要性が強調されるようになって以降の熟達の研究例としては、認知科学領域での巧みな動作の身体運動研究にも見られる。例えば古川らのグループでは、芸術やスポーツなどの高度な課題をこなすことができるスムーズな体の動か

し方を「身体スキル」とし、この身体スキルを姿勢や筋骨格系のレベルと認知プロセスが関与するものであるとしている。彼らはこの身体スキルを理解し熟達化を検討するために、脳神経系・筋骨格系の理解、力学モデルによる運動の理解、運動の計測、計測データの解析、データマイニング、メタ認知(言語化)によるスキル獲得という6つの点から研究をおこなっている(植野・古川, 2009)。

身体スキルを検討する研究のひとつとして、陶芸における菊練りという伝統工芸に関する研究がある(藤波, 2009; 藤波・山本・阿部, 2004)。菊練りとは、ろくろで成形する前に粘土をよく練る作業であり、粘土をこねているうちに菊の模様が表面にできることから「菊練り」と呼ばれる(藤波, 2009 p.232; 藤波他, 2003 p.2)。菊練りでは、粘土の乾燥を防ぐために、熟練者は非常に早く動作を行う。成人男性の熟練者は4kgもの粘土を数分で練ることができるという。それに対し、粘土の重量のために初心者は形を整えることが困難である。ただし、菊練りの動作は2kg程度の粘土であれば女性でも行えるため、力だけで行う動作とは言えない(藤波, 2009 p.233)。彼らの研究では、熟練者、経験者(中級者)、初心者合わせて約20人を対象として、モーションキャプチャを用いて菊練りをする実験参加者の運動を計測し、熟練者の動作の特徴を分析した。その結果、初心者は全身が一つの周期で同期して動いている一方で、熟練者は腰があまり動いておらず、腰を含めた体幹部(腰、首、左右肩、頭)の動きの周期と腕部分(左右肘、手)の動きの周期が異なっていた。つまり、熟練者の菊練り行為は2つの異なる位相をもっていた。熟練者と同様の傾向は、経験者にも見られた。このような運動の特徴について、藤波(2009)は、熟練者の「土を練る」という行為は、体幹部で粘土を押し出す動作と腕で粘土を練りながら体幹部を押し戻すという2つの動作からなりなっていると述べた。これによって、初心者の場合は1回の行為のなかで1回粘土を練っているのに対し、熟練者では1回の行為のなかで2回粘土を練る動作が含まれ、それがすばやく練ることを可能にしていると

考えられた。また、菊練りの熟練者の特徴は、身体のいくつかの独立した動きを異なった位相で組み合わせて一つの行為として成立させていることにあるとした(藤波, 2009)。

このように、認知科学領域において、知性を明らかにする上で身体運動を分析する試みが行われるようになってきている。このような現在の熟達化研究の流れに沿い、本研究でも、身体—環境系¹を重視して熟達化を検討する。ただし、本研究では、身体—環境系を重視するアプローチのなかで、行動が情報によって制御されていると考えるエコロジカル・アプローチ(Gibson, 1979)を参照することとする。

先述の Bernstein(1996)は、熟達したふるまいが *dexterity* をそなえていることを指摘している。*dexterity* とは、“あらゆる状況ならびにあらゆる条件下において解決策となる運動を見つけること(Bernstein, 1996 工藤訳 2003, p.21)”と定義されており、“豊かで多様な現実世界の中で直面する新規な運動課題を、その場で利用可能な資源を用いて臨機応変に解決する能力(工藤, 2003 p.311)”を意味するものである。日本語では、*dexterity* は「こつ」、「巧みさ」と訳される。*dexterity* は運動を取り囲む条件で決まるものであり、つまり、熟達したふるまいにおいては身体を取り囲む環境をいかに利用するかが重要であると言える。

さて、エコロジカル・アプローチでは、この *dexterity* が情報を基盤とした身体—環境系において成立すると考える。情報を基盤とすることによって、従来の身体制御、そして従来の知覚の意味は成り立たなくなり、熟達化を担うこれらの側面に対する新たな説明が可能となるだろう。知性への身体や環境の影響を認める研究(Pfeifer & Scheier, 1999 石黒・小林・細田訳 2001 など)においてさえも、「情報によって」熟達したふるまいが制御されていると考えるわけではなく、「情報にもとづく身体制御」という考え方は Gibson のエコロジカル・アプローチに特有のものである。そこで、本研究では、身体性認知科学と同様に身体性を重視することに加え、情報にもとづいて熟達したふるま

¹ 「身体—環境系」という表記は、身体と環境とを切り離して考えるのではなく、一体のものとして捉えることを示している。

いが成立すると考える Gibson(1979)によるエコロジカル・アプローチの立場から熟達化を明らかにする。次節でエコロジカル・アプローチのアイデアを紹介し、それと熟達化との関連について述べる。

1.2 エコロジカル・アプローチと熟達化

前述の通り、本研究では、身体—環境系のふるまいが情報にもとづくとするエコロジカル・アプローチの立場から熟達化を明らかにする。そのために、本節でエコロジカル・アプローチにおける行動の制御の概念について紹介する。生態心理学者 Gibson(1966, 1979)の提唱した特徴的な制御の概念は、Gibson(1966, 1979)の知覚理論にもとづいている。そこで、Gibson(1966, 1979)の知覚理論について紹介し、エコロジカル・アプローチにおける行動の制御について述べる。さらに、Gibson(1966, 1979)の制御概念にもとづいて熟達化をどのように明らかにすることができると考えられるのかを述べる。

1.2.1 エコロジカル・アプローチにおける行動の制御

知覚とは、環境を取り巻く光や音、圧などの刺激をそれら刺激に対応する各感覚器官で受容し、刺激の情報を神経の信号に変換して神経が脳の特定位に情報を伝達し、脳で受け取った情報を解釈する心の働きであるとされる(Marr, 1982, 乾・安藤訳 1987 など)。つまり、知覚とは、内的な心の働きによって外界の世界の見え方を構成するという二元論的な性質をもつ。視覚で言えば、通常は網膜像が知覚の発端となり、この網膜上の二次元の画像を三次元の心的モデルとしていかに知覚するのかが問いとなり、それゆえ、内的な心理過程や神経系の働きに知覚の情報が見出されてきた。

一方で Gibson(1966, 1979)は、知覚について通常の知覚理論での問いとは異なる問い立てをした。動物は環境内を動き回るのので、動物が見る光や聞く音、嗅ぐ匂い、接触の強度は、場所や動物自身の動きによって変化する。そうであれば、受容器の受け取る刺激

やそれに伴う感覚作用も常に変動しているはずである。そのような絶え間ない変化のなかで動物はどうやって一定の知覚を得ているのか(Gibson, 1966, 1979; バレット, 2013)。その問いに対しての答えとして、Gibson(1966, 1979)は、動物の移動や環境の変動でも変化しない情報が環境にあるとした。そして行為者は、知覚器官を備えた身体を制御し、その情報を抽出する、と主張した。

生態学的環境

Gibson(1979)は知覚情報が環境にあることを説明する上で、まず、生態学的環境を設定した。Gibson(1979)の指摘する環境とは、知覚し、行動する生活体、すなわち動物の周囲の世界を指している。環境は動物を取り巻くさまざまなもの(surroundings)から成り立ち、そこに生活する動物を包含しており、動物と環境には切り離すことができない相互依存的な関係がある。地球は、生命が現れたことによって環境になったと言える。さらに、物理学や自然科学における空間や時間、物質、エネルギーなどの基本的な概念は、動物と環境の相互関係や生活体—環境の概念に導くものではない。したがって、動物が知覚し、行動する環境は、物理的環境とは異なるものであり、動物を包囲するものである(Gibson, 1979 古崎・古崎・辻・村瀬訳 1985, pp. 7-8)。通常の知覚理論では、動物の知覚する環境は動物を包含せず、動物にとっての意味を含まないものであるため、動物が環境を知覚するときには動物にとっての意味が処理過程で付与されると考える。しかし、知覚するものが生態学的存在である場合、意味を付与する必要はなく、見出され得るとされる。その根拠について以下に検討する。

光のなかにある情報

新しい知覚理論を説明する下準備として、Gibson(1979)は、まず生態学的環境を定義した。次に、環境を知覚する観察者にとって有効な情報について、視覚を例として、生態光

学(Gibson, 1961)の立場から説明した。生態光学とは“知覚に対する有効情報に関するもので、物理学や幾何光学とは違うし、生理光学とも異なる(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.51)”ものである。従来、視覚は光刺激が目に投射され、網膜に見ている対象の像が結ばれることによって成立すると考えられている。この理論では、刺激としての光は放射される光であり、点状の、瞬間的に存在するようなものとして捉えられている(Gibson, 1961 境訳 2004, p.43)。知覚において重要となるのは放射としての光ではなく、生態学的環境に満たされた「照明」としての光であるにも関わらず、照明としての光についてはわかっていない(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.xii)と考えた Gibson は、知覚に利用される照明としての光がどのようなものであるのかについて述べた。

日中、環境に太陽からの光が降り注ぐ。その放射光の一部は、地上に平行光線で到達するが、他の一部は空気中を伝達されることにより散乱する。この光が肌理のある地面にぶつかる時、さらに散乱する。これを散乱反射という。散乱反射によって反射された光は、さらに次々と散乱し、環境のいたるところに光は進入していく。このように地球と空の間、相対する面の間を何度も反射することにより、環境が光で満ちている状態を Gibson(1979)は「照明」と呼んだ。照明された環境の一点にはあらゆる方向から光線が交差している。つまり光は一つ一つの点を包囲していると言える。光はどの点にも到達し、どの点をも取り囲んでおり、このような光を包囲光と呼ぶ。包囲光は、ある観察点に個体はその位置を占めているかどうかに関わらず、その点を取り囲んでいる。さらには、霧で満たされているような状況を除き、様々な物質から成り、光を吸収する面と反射する面の両方がある環境により、包囲光は方向によって異なる強度（や波長）をもっている。つまり包囲光は環境の特性に応じて構造化される(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.51-55)。

ある観察点で包囲光が構造化される時、それを包囲光配列と呼ぶ。包囲光配列の構造は、観察点に共通の頂点をもつ立体角によって記述される。立体角はそれぞれの大き

さに応じて相互に入れ子構造になっている。観察点に存在する動物が移動することによって立体角は拡大されたり縮小されたりするなど変化し、包囲光配列も変化する。しかしながら包囲光配列は、動物の移動など観察点の移動によって配列のある部分は変化するが、他の部分は変化しないという特徴をもつ。このときの変化は、動物が移動することに起因し、無変化は環境の配置に起因する。Gibson(1979)は前者を包囲光配列の遠近法構造と呼び、後者を不変構造と呼んだ。遠近法構造は動物の移動によって変化するため、移動の情報となる。不変構造は環境の配置を特定し、環境内で変化が生じた場合にはその光学的配列に乱れが生じ、環境の情報となる。したがって、このような包囲光配列の遠近法構造と不変構造は観察者にとって重要な情報となる(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.70-79)。

包囲光配列の遠近法構造と不変構造が観察者にとっての情報になるということをもう少し具体的に示そう。ある動物を取り囲む包囲光全体が流動する場合には、包囲光配列はその動物の移動を特定する。包囲光の全体が止まっているが一部のみが流動するとき、包囲光の中心にいる動物が止まっていて、その動物以外の環境の何かが動物とは独立に動いたことを特定する。例えば、観察点に対して包囲光配列の局所的な流動が拡大すれば、それは観察者に対して何かが接近していることを特定する。静止した観察点の視線にある軸を中心に球が回転すると、その球の肌理に一種の剪断ないしはすべりが光学的に生じ、輪郭が特定される。さらに、その球の表面では肌理の圧縮と伸展が生じる。このように、動物の移動や環境の変動は、動物を取り囲む光などのエネルギー場の流動に反映され、動物と環境との関係が包囲光のパターンに特定される。そのような意味で包囲エネルギー場の流動は「情報」である(Gibson, 1979 p.81; 三嶋, 2000 pp.161-162)。ここで注意すべきは、包囲光配列から特定される情報は、環境の対象や生起する事象そのものとは異なるもの—具体物ではなく、具体物を特定するパターン—であり、配列の中にコピーのようなかたちで対象や事象が存在するわけではないということである。

加えて、Gibson(1966, 1979)の知覚理論にとって重要なのは、情報は環境を特定するだけでなく、観察者自身のことも特定するということである。上記のように、包囲光配列の乱れは環境で生じた事象を特定する。ある動物を取り囲む包囲光全体が流動する場合には、その観察者の移動が特定される。環境を特定する情報を外部に特定された(exteriospecific)情報、観察者を特定する情報を自己に特定された(propriospecific)情報(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.121)と言い、Gibson(1979)は両者を区別している。観察者が環境を見るときには、自分の視野によって遮蔽されていない部分が知覚される。このとき、観察者は境界のない包囲光に取り囲まれているにも関わらず、観察者が得る情報は観察者自身の視野によって遮蔽された環境の情報なのであり、それゆえ、環境を遮蔽する自己の情報も含まれる。頭を動かすことによって観察点が変わると、ある観察点では遮蔽されていた環境の部分が露わになり、逆に、露わであった環境の部分が遮蔽される。このときも、環境の情報とともに観察点の変化という自己の情報が含まれる。さらには、自分自身の身体が視野にあらわれることによって、通常、包囲光のなかには、観察点に対する鼻、手足などの自分の身体部位がどのような距離にあるのかを示す情報が存在する。このような意味で情報は環境の配置を示すだけでなく、自己についても示しているのである(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.121-125)。Gibson(1979)によれば、自己特定の光学的情報によって特定される 3 つのタイプの運動がある。ひとつは、身体に対して頭を傾ける運動である。この運動の光学的情報は包囲光配列の上を視野がさっと通過していくことであり、包囲光配列の構成要素の漸次的な増加や減少と言える(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.89)。もうひとつの運動は、身体に対する四肢の運動であり、この運動の光学的情報は、視野に特殊な形態をしたものが突き出てくることである。三つめは、環境に対する身体の移動である。身体の移動を特定する情報は、包囲光配列の流動である。

知覚システム：環境に存在する情報をピックアップする身体

通常の知覚理論では、知覚とは、知覚情報が感覚器官の受容器で受け取られ、脳に伝達されて解釈される過程である。それに対し Gibson(1966, 1979)の知覚理論では、包囲光配列のなかにある情報が環境と知覚者の事実を特定しているとのことであった。このような情報が環境に存在するとする場合、情報を解釈・構成する必要はなく、従来の意味での知覚とは異なる知覚の説明が必要である。Gibson(1966, 1979)が考えたのは、受動的に情報を受け取り解釈する知覚過程ではなく、「知覚システム」という環境の知覚情報を能動的に獲得する身体であった。

通常、感覚のための器官は受動的とみなされ、刺激は感覚器官の受容器に受け取られる。一方で、Gibson(1966)は、動物が受動的に刺激を受け取ることは稀であり、動物の知覚は能動的であると指摘した。それに関して Gibson(1966)は次のように書いている。

“覚醒し、警戒している観察者は、受容器に至る刺激を受動的に待つのではなく、刺激を探している。彼は、光、音、匂い、接触が利用できる場を探して何が重要かを選択し、情報を引き出す。刺激が押し付けられる場合でも、観察者は、刺激に接するとすぐそれを変え始める。光線の方向に向いてしまったら、それを避ける。両耳で刺激のバランスをとりながら、音の方向に向かう。匂いを嗅ぐ。突き棒の刺激から逃れ、圧の柔らかいほうに向かう。押しつけられる刺激の検知は、すぐに能動的な知覚に道を譲るのである...感覚のための器官は受動的な受け手とみなされており、それゆえ受容器と呼ばれる。しかし両眼、両耳、鼻、口、皮膚は実際には動き、探し、定位する(Gibson, 1966 佐々木・古山・三嶋訳 2011, p.39).”

このように、Gibson(1966)の指摘する知覚とは、能動的であり、情報への感受性を備え

た身体を調整し、環境を探索する行為である。通常の感覚・知覚過程で問題となるのは、刺激と接触した際に神経インパルスを開始する受動的な機構としての受容器である。一方で、この「受容器」という言葉は、例えば眼のような、調整し、環境を探索する能動的な機構に対しても用いられる。Gibson(1966)は刺激を受容する受動的な機構を受容器とし、それに対してエネルギー受容器や受容単位を含み、環境を探索する能動的な機構を器官として区別した。さらに、一つの器官は、他の器官と「システム」をなしているとした(Gibson, 1966 佐々木他訳 2011, pp.48-50)。器官がシステムをなしているということは、たとえば視覚の場合で次のように説明がなされている。

“1 個の眼は、既に、網膜像を鮮明にできる水晶体と、光の強度を最適にする瞳孔をもつ 1 つの器官であるが、それは低次のシステムである。この眼に筋がついたものが高次のシステムである。それは内耳のはたらきによって、頭部において相対的に安定し、環境を走査できる。2 つの眼がともにはたらくと、さらに高次の、二重のシステムができる。両眼は近くのものを見るために寄り、遠くのものを見るために離れる。両眼と頭と身体のシステムは、姿勢の平衡や移動とともににはたらくことで、世界を歩きまわったり、すべてのものを見ることができる(Gibson, 1966 佐々木他訳 2011, p.50).”

つまり、Gibson(1966)の知覚理論では、知覚を考える上で受容器のような解剖的な単位ではなく、入れ子状に成り立つシステムのような機能的な単位を問題とするのである。知覚における機能的な単位を考えた場合、知覚に関与するのは全身なのだ。

Gibson(1966)は知覚情報をピックアップする知覚器官を含めた探索的な身体を「知覚システム」(Gibson, 1966 佐々木他訳 2011, pp.55)と呼んだ。知覚システムは、基礎定位システム、聴覚システム、触覚システム、味覚—嗅覚システム、視覚システムの 5 つに分

類されている。このうち、基礎定位システムは全身の一般的な定位を担っており、他の知覚システムの基礎となるものである。それ以外の知覚システムは、聴く、さわる、嗅ぐ、味わう、視るという注意の方法をもつ。それら注意は、耳—頭部システム、手—身体システム、鼻—頭部システム、口—頭部システム、眼—頭部システムによってなされる。各知覚システムは、環境の情報をピックアップするために、知覚システムを調整し、情報に対して適切に定位づける(Gibson, 1966 佐々木他訳 2013, pp.57-63)。

従来の知覚理論における知覚の過程は、刺激を受容器で受け取り、解釈するというものである。それに対して、Gibson の知覚理論(1966)における知覚の過程は知覚器官をもつ身体が情報をピックアップするというものである。ではどのように情報が獲得されるのか。Gibson(1966)は、ヒトの視覚システムは、包囲光配列の新しい標本を次々と見ることと定義される走査によって、情報をピックアップと言った。視覚システムによる包囲光配列の標本抽出には、観察点の移動によるもの、頭部の転回によるもの、眼球の転回によるもの、中心窩の探索によるものがある(Gibson, 1966 佐々木他訳 2013, pp.287-304)。具体的な例を、Gibson(1966)は次のように書いている。

“たとえば、色鮮やかな本が投射する包囲配列の一部が、部屋に入った人の興味を引くことを特定すると、視線は、それを注視し、移動し、操作することで、10度や20度の角度までそれを拡大し、強め、そして眼球の狭い中心円錐でその印刷物の走査を始める(Gibson, 1966 佐々木他訳 2013, pp.297).”

Gibson(1966)の指摘した、感覚器官を備えた身体を動かし、環境を知覚探索する動きは刺激情報のピックアップに役立つ。一方で、このような動きとは区別される、行動するための動きもある。知覚情報のピックアップに役立つ運動は「探索的」あるいは「探査的」と呼ばれ、行動するための運動は「遂行的」あるいは「実行的」と呼ばれる。これ

は、受容器は専ら世界から刺激を受け取り、効果器は専ら環境に作用するという通常の説明とは対照的である。身体は遂行的、探索的な運動を同時に行っていると考えた場合、受容器と効果器、感覚と運動というような対比は成り立たなくなる(Gibson, 1966 佐々木他訳 2011, pp.38, 54)。

アフォーダンス

これまで Gibson(1966, 1979)の知覚理論について、生態学的な環境、包囲光配列における情報、知覚システムによる情報の探索・ピックアップについて記述してきた。それらをまとめると、知覚とは知覚システムを備える身体が環境の包囲光配列等のエネルギー分布に存在する情報を探索し、抽出する活動と言える。Gibson(1966, 1979)の知覚理論にもとづいて行動を説明する際に、もうひとつ重要な概念がある。それがアフォーダンスの概念である。

環境のアフォーダンスとは、“環境が動物に提供する(offer)もの、良いものであれ悪いものであれ、用意したり備えたりするもの(Gibson, 1979 古崎他訳 1985 pp.137)”であり、環境が動物に提供する行為の可能性である。例えば、ペンは人に握ることをアフォードするが、象や牛は握ることをアフォードしない。水中の岩と水底面で形成された小穴は小型の魚が隠れることをアフォードするが、クジラには隠れることをアフォードせず、人にはその中に手を入れることをアフォードする。このように、環境が動物に提供する行動の意味や価値がアフォーダンスなのである。動物の身体が異なれば動物と環境との関係は異なるので、同じ環境の特性がすべての動物に等しく同じ行動の価値や意味をアフォードするわけではない。このような、環境が動物に提供する意味や価値としてのアフォーダンスについて Gibson(1979)は次のように書いている、

“環境のアフォーダンスをめぐる重要な事実は、価値や意味がしばしば主観的、

現象的、精神的であると考えられているのとは異なり、アフォーダンスがある意味で、客観的、現実的、物理的であるということである。けれども実際には、アフォーダンスは主観的特性でも客観的特性でもない。あるいはそう考えなければその両方であるかもしれない。アフォーダンスは主観的—客観的という二分法の範囲を越えており、二分法の不適切さを理解させる助けとなる。それは環境の事実であり、同様に行動の事実でもある。(Gibson, 1979 古崎他訳 1985 pp.139).”

さらに、アフォーダンスは、動物にとっての行為の可能性であるとともに、包囲光の構造にある情報によって特定される意味や価値である(Gibson, 1979)。例えば、環境内の何かが行為者に対して接近すれば、その動きは環境の「見え」の流動すなわち「オプティック・フロー」として、環境を見る行為者の視知覚に反映される。もし、オプティック・フローの情報から、ある物体が自分に衝突するというアフォーダンスが特定されれば、行為者はその物体を避けるなどの行動をするだろう。物体との衝突を回避する行動をとれば、行為者のオプティック・フローの情報からは衝突するというアフォーダンスはもはや特定されなくなるだろう。つまり、Gibson の理論(1979)では、身体—環境系の変化のなかでアフォーダンスを特定する情報を探索・抽出することによって行動が成立すると考える。これは、一般的に行動が、感覚器官で刺激を受容し、その刺激が脳に伝わり、脳から筋肉に指令が出て、反応が起こることで成立し、脳が行動制御の主体として仮定されていることと対照的である。Gibson の理論(1979)では、情報が知覚を引き起こすわけではなく、情報によって特定されるアフォーダンスが行動を引き起こすわけでもない。行動は、アフォーダンスを特定する情報によって制御されるのである。

また、上記の事例のように、Gibson の理論(1979)では、物体が衝突するという知覚が衝突を回避する行為を導き、その行為が物体と衝突「しない」情報の知覚を導く。つまり、

知覚は行為を導き、行為は知覚を導く(Gibson, 1979)という相補的・循環的な関係がある。したがって、行為は、入力としての知覚に従属するのではなく、知覚情報の特定に貢献するのである。さらに、知覚と行為の循環のなかで、行為者に提供される行動の可能性としてのアフォーダンスは変化しうるのである(Fajen, Riley, & Turvey, 2009)。

Gibson 理論における行動の制御

これまで Gibson(1966, 1979)の知覚理論について、生態学的な環境、包囲光配列において特定される意味のある情報、知覚システムによる情報の探索・ピックアップ、情報によって特定されるアフォーダンスについて述べた。その中で、身体運動制御との関係で鍵となるのが、知覚システムによってピックアップされる情報が環境を特定するだけでなく、観察者自身の身体を特定するということである。先に述べたように、包囲光配列全体によって生じるオプティック・フローすなわち **global flow** は、照明された環境に対して観察点が変わることによって生じ、観察者の移動を特定する。**global flow** が観察者の移動を特定するのに対して、環境内の対象の運動を特定する情報は、包囲光配列の局所的な流動すなわち **local flow** である。光学的情報の自己特定性がもたらす重要な事実、視覚によって自己の身体運動に関する情報を検出可能であり、その情報を用いて自己の身体運動の制御に利用することができるということだ。この点に関して Gibson(1964, 境訳 2004)は次のように述べている。

“運動遠近法は対象の運動の知覚ではなく、観察者自身の運動の検出を引き起こす。内観的な態度から言えることだが、自動車を運転しているとき、観察者は確かに、前方の視野に見かけの遠心性の流動が生じると報告する。しかし、観察者が通常意識するのは、変化しない世界の中で自分が移動していることだけである。これは、視覚的意識性なのか、それとも運動感覚的意識性なのか。

いずれか一方だけとすることは、不可能である(Gibson, 1968 境訳 2004 pp.136).”

要するに、“視覚も、筋—関節—皮膚系や内耳系と同様、身体の運動を記録するという点で運動感覚的(kinesthetic)である(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.197).”これを Gibson(1958, 1966, 1979)は、視覚的運動感覚(visual kinethesis)と呼んだ。この視覚性運動感覚は、例えば、横断歩道で止まっている際に、横断歩道の対岸にいる他者の運動につられて動いてしまうときなどにみられるものである。見ることは、環境を把握すると同時に、自分自身の身体を制御することでもあるのだ。

Gibson(1979)は、この視覚性運動感覚にもとづいた行動の制御について、行動を移動と操作に大別して説明している。移動というのは、知覚システムを備えた身体による観察点の移動である。移動は、視知覚によって導かれている点で知覚に依存するが、環境を適切に知るには動く観察点が必要であるという点で知覚は移動に依存する。一方、操作とは、おもに手の運動による操作のことを指し、知覚に依存し、また、知覚を促進しうる行為のことを指す(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.238)。どのように移動や操作が視覚情報によって制御されるのかについての Gibson(1979)の説明を以下に述べる。

移動の視覚性制御のための法則。 移動がどのように制御されるのかについて、Gibson(1979)は、光学的情報との関係で記述し、提案している。なお、移動の視覚性制御の法則は、その個体が移動を方向づけたり、開始したりできる場合に適用されるものであり、助手席に乗車している人や母親の袋に入って運ばれるカンガルーの子どもなどの移動には適用されない。

Gibson(1979)が説明した移動の法則のひとつに、直立(standing)、足を地面に接触させておくことがある。直立は、包囲光配列の暗々の地平線を利用して、視野の境界を保てば維持できる。別の法則としては、始動(starting)、停止(stopping)、後退(going back)が

ある。動き始めることは包囲光配列を流動させることによって、止まることは流動する包囲光配列を消すことによって、進行方向と逆方向に動くことは包囲光配列の流動を逆にすることによって達成される。さらに別の法則として、接近(approaching)がある。接近は包囲光配列中の領域を拡大することである。ある対象を詳しく調べるには、包囲光配列中の領域を細部が見られるまで拡大すれば可能になる。字を読むには文字がわかる程度にまで包囲光配列中の領域を拡大する必要がある。つかめるものを操作するには、その対象が手の届く範囲に入るまでその領域を拡大すればよい。直立、始動、停止、後退、接近以外にも、舵取り(steering)や囲いに入ること(entering enclosures)、安全な距離を保つこと(keeping a safe distance)について、光学的情報との関係でそれらがどのように達成されるかを Gibson(1979)は述べている(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.247-249)。

操作の視覚性制御のための法則。 操作の法則(Gibson, 1979)のなかでは、手の運動がいかに視覚的に制御されるのかが説明されている。例えば、手を伸ばして取ることは、対称物に接触するまで腕の形を伸ばして手の形を縮小することによって成立する。道具使用(tool-using)については、道具は手の延長と考えることができるので、手でつかむための法則と類似している。その他、ある標的を打ったりたたいたりする、狙準(aiming)の場合や、投げること(throwing)、隠れた面を知覚するための操作の法則についても記述されている(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.249-251)。

これら移動と操作は刺激に対する反応に帰せられるものではないし、中枢による制御がなされるものではない。移動や操作は知覚情報によって、つまり、知覚システムをもつ身体が外界における自己を見ることによって制御される。さらに、情報によって制御されるから、行動は規則的になり、法則性があるものになる(Gibson, 1979 古崎他訳 1985, p.240)。

1.2.2 エコロジカル・アプローチにおける行動の研究

上記の説明をまとめると、エコロジカル・アプローチでは、行為者が知覚する情報は環境に存在し、その情報の知覚探索とその利用によって身体制御がなされると考える。このときに重要になるのが、情報は環境だけではなく自己を特定しており、そのことによって成立する視覚性運動感覚が、身体運動の制御に役割を果たしているということである。このようなアイデアにもとづいて、多自由度をもつ身体のふるまいとしての行動をどのように検討し、熟達化を明らかにできるのかを考えるため、エコロジカル・アプローチの行動に関する実証研究ではどのようなことが行われているのかを紹介する。

エコロジカル・アプローチでは、行動を制御する情報は環境にあるとしている。そのことを実証していくためには、その行動の成立を支える知覚情報が実在するかどうか問われる。したがって Gibson 理論の文脈に沿った研究では、行動の制御に利用されるであろう実在する知覚情報を発見するための実証研究が中心としてなされてきた。

光学的情報タウ

知覚情報へのエコロジカル・アプローチにおける代表的な研究のひとつが、行為者と環境との関係から接触までの時間的猶予(time to contact)を視覚的に特定する τ (Lee, 1976 など)の研究である。 τ による行動制御の理論は、Gibson(1958)が主張したオプティック・フローを利用する移動方略について、その一部を定式化したものであると言える。Lee(1974)は、障害物に対するブレーキ操作が、オプティック・フローを利用してどのように制御されるのかについて仮説を提出した。のちに、その仮説は、ブレーキ操作は光学的変数である τ という情報にもとづいているという理論に発展した(Lee, 1976)。 τ とは光学的なパターンの拡大率(の逆数)であり、行為者と環境がある割合で接近するときの接触までの切迫度を特定する。視覚情報 τ の研究は、その後、様々な事例での検証がなされ(例えば Lee, Davies, Green, & van der Weel, 1993; Lee & Reddish, 1981; Savelsbergh, Whiting, & Bootsma, 1991 など), Lee(1998)により一般化がなされた。そ

の「一般 τ 理論」のなかで、Lee(1998)は、 τ が単独で利用されるのではなく、複数の τ が利用される事態にその理論を拡張した。2 つ以上の平行した出来事において同時に接近が起こり、それを一体のものとして制御する場合には、2 つの出来事で生じる 2 つの τ は連続的に一定の割合で協調している必要があり、これを「タウカップリング」と呼ぶ。Lee(1998)は、タウカップリングにおける 2 つの τ の比によって、接触時の激しさが特定されるとも述べている。この τ カップリングの理論を用いて、乳幼児のサッキング (Craig & Lee, 1999) や早産児と満期児のキャッチング動作の発達 (Kayed & van der Meer, 2009) や歩行行時のバランスの制御 (Remelius, Hamill, & van Emmerik, 2014) などが検討されている。

ダイナミックタッチ

τ 研究とともに、エコロジカル・アプローチにおける知覚情報についての代表的な研究が、ダイナミックタッチの研究 (Turvey, 1996 など) である。ダイナミックタッチとは、知覚者が振ることのみにもとづいて物体の様々な特性 (長さ, 幅, 重さ, 方向) を知ることができる触知覚のひとつである。ダイナミックタッチという言葉は Gibson (1966) に由来するものであるが、実験的なパラダイムは Solomon & Turvey (1988) によって考案され、Turvey らが一連のダイナミックタッチ研究として展開させてきた (Carello & Turvey, 2000; Turvey, 1996)。Solomon & Turvey (1988) に始まるダイナミックタッチ研究では、回転加速に対する抵抗である慣性モーメントが、物体の特性の触知覚を支えるものとして提案された (Carello & Turvey, 2000)。それに対して、回転加速の抵抗に関わらない静モーメントを提案する主張もある (Kingma, Beek, & van Dieën, 2002; Kingma, van de Langenberg, & Beek, 2004; van de Langenberg, Kingma, & Beek, 2006 など)。現在では、物体を振る際の動きの制約によって、重要になる触知覚情報が変化すると考えられている。

Direct learning

このように、私たちは多くの場合、複数の知覚情報から必要なものを探索することが求められる。環境に存在する知覚情報の構造と、その構造の探索を通じた情報の特定化の過程を明らかにしようとするエコロジカル・アプローチとしては Direct learning の研究(Jacobs & Michaels, 2007 など)がある。Direct learning 理論にもとづく研究では、利用可能な複数の知覚情報が存在する実験場面を設定し、それら複数の知覚情報を「情報空間」として数学的に定式化しておく。そして実験参加者は、行為を通じてその中から特定の知覚情報を探索し、選択する、いわゆる知覚学習を行うことになる。あるタスクを実行する際に単一の情報のみを用いると仮定すると、そのタスクにおいて行為者が利用する情報が変化していく学習の事態を捉えることができない。そのような事態をも説明可能なように、Jacobs & Michaels(2007)は、タスクに関連する複数の情報が分布する「情報空間」を設定し、また数学的に定式化することによって、情報利用の連続的な変化を定量的に明らかにできるようにした。Direct learning の研究では、これまで主としてダイナミックタッチを題材として知覚判断の変動性とそのときに利用される知覚情報との関係、知覚判断に対してフィードバックを与えたときの知覚情報の利用の変化、棒を振る運動と情報との関係などが検討されている(Arzamarski, Isenhower, Kay, Turvey, & Michaels, 2010; Jacobs, Silva, & Calvo, 2009; Michaels, Arzamarski, Isenhower, & Jacobs, 2008; Michaels & Isenhower, 2011).

行動の制御における知覚探索する身体的重要性

このように、エコロジカル・アプローチの知覚運動研究では、行動に利用される知覚情報の研究が重要視されてきた(Warren, 2006)。エコロジカル・アプローチの実証研究で知覚情報研究が中心としてなされてきた背景には、多自由度をもつ身体が変化する環境

のなかで適切に制御されることを説明するにあたり、行動の制御を担う情報の存在が重要となるからであろう。行動に利用される知覚情報を定量的に示すことは、通常の知覚理論で想定されているような神経の過程や脳による解釈によって情報が見出されるのではなく、環境に情報があることを示す点で重要な研究であると言える。ただし、行動とは、身体—環境系において行われるものであり、知覚情報だけで成立するものではない。知覚情報の研究との関連で、環境に存在する知覚情報を利用していかに身体を制御し、当該のタスクが実行されるのかの検討もなされている(例えば Bardy & Laurent, 1998; Bootsma & van Wieringen, 1990; Lee, Lishman, & Thomson, 1982; Peper, Bootsma, Mestre, & Bakker, 1994.など)ものの、そのような研究は知覚情報の研究に比べれば多く行われていない。しかしながら、環境にある情報を利用して遂行する行為がいかになされるのかということも、情報にもとづいた行動のプロセスを示す点で重要であろう。一方で、行動の制御に利用される情報源としてのアフォーダンスが静的であることや、一か所に局在することはめったにないので、行動に役立つ情報を得るためには知覚システムによる探索的なふるまいが必要とされる(Reed, 1996 細田訳 2000)。行動する上では行為者、環境の変化は常であり、行為者の意図に合うアフォーダンスが常にただそこにあるわけではなく、そのなかである行動を達成しようとするれば、環境の変動の中で、行為者が知覚システムを調整する必要があるのだ。したがって、適応的な側面をもつ熟達者の身体制御を検討する上では、情報の探索を行う知覚する身体を明らかにすることが重要になるであろう。

タスクの達成をサポートし、視覚を調整する姿勢

身体—環境系の循環の中で知覚システムを備えた身体がいかに知覚を導くのかという探索的な運動の実証的な検討は、知覚情報研究に比して多くはないが、Stoffregen らによる姿勢研究を挙げることができる(Stoffregen, Smart, Bardy, & Pagulayan, 1999;

Stoffregen, Pagulayan, Bardy, & Hettinger, 2000 など). 彼らの研究は, Gibson(1966)の知覚システム論において, 特に視覚システムの理論を展開させているものである. また, Gibson が指摘していた自己特定性にもとづく視覚性運動感覚, つまりは移動の制御についての実証研究を行った Lee ら(Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975)の姿勢研究の流れにある研究でもある.

古典的には, 視覚は外受容感覚として想定されていたが, 自己受容的でもある(Gibson, 1966). 先にも述べたように, 自分の身体が動くと, それがオプティック・フローから特定される. 従来, 姿勢の制御においては, 固有受容感覚や前庭感覚のはたらきが重視され, 視覚のはたらきは重視されていなかった. Lee & Aronson(1974)の研究では, 自己を特定する情報が立位を保つことに実際に利用されているのかどうかを, 幼児を対象として検討した. 彼らの実験では, moving room という3つの壁と天井でできており, 前後に動く部屋(ただし, 床面は動かない)を用いた. 壁と天井が動かされると, 包囲光配列全体の流動が生じ, 部屋の内部で壁に相対して立つ人は, 自分が動いていないにも関わらず, 自分が動いたことが特定される. 実験では, 部屋が動かされたとき, 幼児は部屋が動いた方向に対して動き, 補償的な運動を行っていた.

姿勢制御における視覚の役割を検討する研究では, 実験参加者に静止立位を求め, オプティック・フローは身体の揺れを最小化するように自動的に利用されるということを示してきた. 従来の姿勢制御研究では, 姿勢を動揺させるような実験的操作を行うことはあるものの, 静止立位の維持を課題としていたため, 何かを読むことや, 視覚探索すること, 歩行することなどのような他の行動との関係で姿勢がどのように制御されるのかを検討することが難しかった. Stoffregen ら(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)は姿勢の制御の上位にあるタスクや行動の目的を上位姿勢タスクとして, 「姿勢」を, 他の活動を可能にし, その活動の達成を促進するものであると主張した. この考え方にもとづけば, 他の活動(上位姿勢タスク)に対して姿勢の揺れを最小化することは

効果的であるかもしれないし、そうではないかもしれないことになる(Mitra, 2003 p.254; Stoffregen et al., 1999). このような姿勢観にもとづき, Stoffregen ら(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)は上位姿勢タスクにおける姿勢の制御を検討してきた.

Stoffregen et al., (1999) では, 姿勢がオプティック・フローによって制御されるときの姿勢への制約の影響を検討した. これらの 3 つの関係を検討するために, 上位姿勢タスクを変化させて姿勢制御への制約を与えること, 視覚的な環境の構造を変化させて, 自発的な姿勢制御によって生じるオプティック・フローの配置を変化させることを行った. 実験では, 実験参加者は遠くにあるターゲットを見る課題, 近くにあるターゲットを見る課題, 近くにあるターゲットを無視して遠くにあるターゲットを見る課題を行った. 頭部運動の位置のばらつきが姿勢の大きさの指標として使われた. 姿勢動揺は, 見えてはいるが注視されない近くにあるターゲットによって影響されず, 実験参加者がターゲットを見る位置(距離)に影響されていた. したがって, 実験時の姿勢は, オプティック・フローによって自動的に制御されたというより, ターゲットを見るという上位姿勢タスクの影響を受けて制御されており, 上位姿勢タスクのパフォーマンスを促進するように調整されていると考えられた. Stoffregen et al., (2000) では, 異なる種類の視覚的なタスクが姿勢に与える影響を検討した. 視覚的なタスクには, 前方に貼られた白紙を見るタスクと前方に文章が書かれた紙が貼られている際に文章中の特定の文字を数えるタスクがあった. 実験時の参加者の頭部の前後方向の時系列データが分析された. その結果, 白紙を見るタスクよりも, 視覚探索を必要とする文字を数えるタスクにおいて姿勢動揺が減少していた. この結果は, 視覚探索を促進するように姿勢動揺が減少したのではないかと結論付けられた. また, Oullier, Bardy, Stoffregen & Bootsma (2002) でも, 環境の物体を見る, トラッキングするという 2 つの異なる視覚的なタスクでの姿勢制御が検討された. その結果, 知覚者の頭部運動と環境の運動とのカップリングはトラッキ

ング課題のほうが強く、腰と足首間の協調は両方のタスクで質的に似たものであった。Stoffregen et al., (2000) と Oullier et al., (2002) の研究からは、視覚的なタスクが異なると、視覚システムとしての姿勢の制御も異なってくると言えよう。Stoffregen, Yang, Giveans, Flanagan & Bardy (2009) では、行為者にとって新規のアフォーダンスを知覚する際の姿勢の役割が検討された。実験では、車いすで移動するときに通過できる高さを判断する課題が車いすでの移動経験のない人を対象として行われた。判断課題の前に車いすでの移動を最大 2 分間練習する群と練習しない群があった。実験時には頭部と胴の運動が計測された。実験の結果、車いす移動の短い練習をしなかった群よりも練習をした群のほうが車いすで通過できる高さの判断がより正確であった。また、車いす移動の練習が判断課題時の頭部や胴の運動に影響を与えていた。これらの結果から、練習が判断時に頭部や胴による視覚探索運動を調整することを可能にし、そのために知覚判断が正確になったのではないかと結論付けられた。

Stoffregen らの姿勢研究(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)の結果は、熟達を考える上で重要な示唆をもつ。それは、タスクに応じた姿勢制御、視覚の調整することがタスクの達成を促進していると考えられる点である。視覚システムを備えた身体の姿勢制御がタスクの成立に寄与するのであるから、姿勢がどのように制御されているのかを分析することが熟達の理解につながり得ると考えられる。また、Stoffregen ら(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)の姿勢は、(Lee & Lishman らの固有受容感覚に)身体の運動によって生じた光学的配列の全体的な流動(global flow)を制御するものであり、移動であると考えられる。したがって、Stoffregen ら(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)の研究は、言うならば「global flow の制御」を問題とする研究と位置付けられるだろう。

視覚を調整する操作

Stoffregen らの姿勢研究(Stoffregen et al., 1999; Stoffregen et al., 2000 など)は、行為者が移動によって **global flow** を制御し、視覚の調整をすることで、タスクの達成を促すことが可能になることを示すものであった。一方で、情報を得やすくするには、移動だけではなく、操作すなわち **local flow** の制御によっても達成されると先に述べた。行為者が操作によって自分が視知覚することになる環境を制御し、視覚を調整することによってタスクを達成しやすくしていることを検討している事例として、van Santvoord and Beek(1994)によるジャグリングの事例がある。van Santvoord and Beek(1994)の研究では、3つのボールを用いたジャグリングが実験課題とされた。ジャグリングでは、当然ながらジャグラーがボールの軌道を制御しており、従ってボールをキャッチするための視覚情報を生成するのは、ボールを制御するジャグラー自身である。つまり、ジャグリングは、いかに行為が知覚を導くのかを分析する上で恰好の技術・技芸と言える。

彼らの実験では、3人の中級ジャグラーが、あらかじめ設定された間隔でシャッターの開閉をする視野遮蔽メガネを装着してジャグリングを行った。この装置を用いて行動と知覚の関係を調べた背景のひとつには、3つのボールを用いるカスケードジャグリングでは常に2つ以上のボールが滞空しているので、1つのボールだけを追視すればよいというわけではなく、視覚的な注意の向け方の制御が重要になるということがあった。ジャグリングでの視覚的注意を検討した Austin(1976)の研究や、ジャグリングを指導する際になされる「最も高い部分を見なさい」、「前のボールが頂点に到達したときに次のボールを投げなさい」というインストラクションからすると、玉の軌道の頂点をみることが重要だと考えられた。また別の背景としては、ジャグリング時のボールを手にとっている時間とボールが飛んでいる時間は、ある整数比で表されることが明らかになっており、手に関連するイベントと玉に関連するイベントの間で適切な位相関係を達成することが重要になるということがあった。van Santvoord and Beek(1994)は、上記のようなジャグリングの特性に注目し、視野遮蔽メガネを用いることにより、滞空中の玉の位相

とメガネで定義されるリズムのあいだの関係から、メガネのシャッターが開いているときに玉がどこに位置しているのか、手の運動による位相の調整がその玉の軌跡部分に含まれる情報をピックアップすることをサポートしているのかを明らかにできると考えた。彼らの実験から、シャッター開閉の1周期(シャッターの開いている時間と閉じている時間を足した合計時間)を固定し、開いている時間を徐々に減らしていった場合、1人の中級ジャグラーでボールの軌跡の頂点とそこに引き続く部分を見る傾向があり、かつ、実験参加者のなかでそのジャグラーが眼鏡の開いている時間が最も短い状態までジャグリングを達成できた。他の2人の中級ジャグラーでは、手の運動とシャッター開閉のリズムとの間で一貫した関係が部分的に観察され、その場合には、シャッターが開いているときに頂点とそこに引き続くボールの軌跡部分を見る傾向があった。したがって、van Santvoord and Beek(1994)の実験条件下では頂点とそこに引き続く玉の軌跡を見ることがジャグリングの達成において重要であり、頂点に引き続く玉の軌跡を見ることができるよう手の運動の位相が制御され、操作が視知覚を促進していたとすることができるだろう。

van Santvoord and Beek(1994)によるジャグリング研究の事例から、手の運動の制御によって視知覚を導くことが可能であり、このような行為がジャグリングの成功を導いたと言える。一方で、ジャグリングの場合は、ジャグラーが知覚する玉をジャグラー自身が制御することができるので、手の運動による位相の調整によって視覚情報を得やすくすることができたが、他の場面では必ずしも行為者が物理的に環境に働きかけることによってその状態を変化させることができるわけではない。しかしながら、先述のとおり、物理的に環境に働きかけなくても、目を備えた頭部、頭部を支える身体を制御して環境を見やすく調整する姿勢、つまり移動によって「心理的」ないしは「知覚的」に環境に働きかけ、視覚情報を得やすくすることも可能である。

エコロジカル・アプローチにおける視覚を調整する研究

以上のエコロジカル・アプローチにおける姿勢研究やジャグリング研究では、熟達者の臨機応変さに関わるような、情報を得やすくする移動と操作の制御に関する研究が行われてきた。少なくともここで取り上げてきた姿勢研究は、視覚性運動感覚や視覚システムの実証研究として位置づけられるものである。しかしながら、これらの姿勢研究では、タスクの性質上、global flow の制御を伴う移動としての姿勢が扱われており、物理的に環境に働きかける手の操作が local flow に影響するようなタスクでの検討はなされていない。また、熟達者のもつ適応的な側面に着目すれば、時空間的な制約がより厳しく、使用すべき情報が非熟達者にとって必ずしも露わではないようなタスクでの姿勢制御が検討されることによって、情報探索における姿勢調整の意義がより明らかになると考えられる。

一方、ジャグリングは、時空間的な制約が厳しく、いわゆるこつの必要なタスクであり、van Santvoord and Beek(1994)の研究ではジャグリングの玉の操作が検討された。Huys & Beek(2002)ではジャグリングのタスクにおいて、熟練ジャグラーと中級ジャグラーの視線を比較している。ジャグリングの場合の移動の制御を考えてみると、観察点を一定にし、global flow が静止した状態で玉を見ることがジャグリングの成功につながると考えられる。しかしながら、スキルを必要とするタスクのすべてが、global flow を静止させる中で操作をするわけではない。例えば、けん玉は、自分で知覚することになるけん玉を動かすタスクであり、ジャグリングと同様に手の操作を伴うタスクである。一方で、けん玉は、膝の運動が重要であると一般に言われるが、その膝の運動によって観察点の変化が生じると考えられ、包囲光配列の全体的な流動が生じるなかで操作も同時に制御される事象である。ジャグリングや姿勢研究とは異なる光学的情報が必要となり、異なる身体制御が問題となるであろう事象において、どのように視覚システムを備えた身体の移動と操作がなされているのかを検討することには意義があると考えられる。

1.2.3 エコロジカル・アプローチと熟達化研究

エコロジカル・アプローチにおける知性

ここでエコロジカル・アプローチにおける行動の制御について再度まとめる。エコロジカル・アプローチでは、知覚システムを備えた行為者によって知覚される情報が環境に存在し、その情報を利用することで身体運動の制御がなされ、知覚と行為の循環の中で動物の行動が成立すると考える。その意味で、身体、環境、行為者と環境の特性を反映した情報そしてアフォーダンスを分離することはできない。

このような Gibson(1966, 1979)の行動制御理論のアイデアは、知的なふるまいは身体と環境との自律的な相互作用から生じるという「身体性」のアイデアや、環境で利用可能な行動の資源を効果的に利用することを重視する「dexterity」のアイデアと、身体—環境系の相互作用を重視すると言う点では類似している。一方で、Gibson の行動制御理論(1958, 1966, 1979)では、行動の制御は情報の探索と利用によってなされており、それによって熟達者の巧みな身体運動制御が成立すると考える点では異なる。Gibson の行動制御理論(1958, 1966, 1979)では、認知過程のみを心にとらえるのではなく、身体—情報—環境系を心、そして知性と捉えることができると言えよう。

本研究の射程

先に述べたように、熟達したふるまいに見られる dexterity は、特定の運動能力に帰属されるものとしてではなく、環境を効果的に利用するための柔軟な調整活動—すなわち、運動の恒常的な変更—として描かれる。その意味で、行為者による環境のアフォーダンスの知覚的な利用と、そのための絶え間ない知覚システムの調整活動を重視する Gibson(1966, 1979)のエコロジカル・アプローチは、熟達化を探る上での有効な枠組みとなりうるだろう。一方で、エコロジカル・アプローチでは熟達したふるまいが情報に

もつづいた制御によって成立すると考えるため、熟達したふるまいの制御を担うものについて、本研究は示唆をもたらすと考えられる。また、エコロジカル・アプローチでは、知覚は、知覚器官を含む知覚システムとしての身体で制御されるものであり、環境の情報を探索する活動として捉えられている。姿勢(移動)によって視覚を調整し、タスクによっては手の操作を利用して視覚を調整し、促進することが可能である。行為者や環境の変化などタスクの条件や制約が変化しても臨機応変にふるまうことができるという熟達者のスキルの新たな一面を明らかにしようとするならば、身体が情報にもつづいて姿勢や操作が情報との関係でどのように視覚を調整するのかを検討する必要があると考えられる。というのも、行為者が動き、環境が変化するなかで行動に役立つ情報を得るためには知覚システムの調整が必須であるからだ。そこで本研究では、エコロジカル・アプローチの立場から、身体がいかに情報を探索するのかに注目し、熟達化を検討していく。

2章 ふりけんにおけるけん玉初心者群と熟練者群の姿勢制御

本研究では、熟達したふるまいが情報にもとづいて成立すると考えるエコロジカル・アプローチの立場から熟達化を検討する。エコロジカル・アプローチの立場では、身体の制御は情報の探索と利用のなかでなされるのであるが、熟達者のスキルを検討するさいには、姿勢による global flow の制御や手などによる操作をいかに行うのが重要になると考えられた。(ここで、熟達化研究との差異を話す。)すでに姿勢研究(Stoffregen et al., 1999 など)やジャグリングの研究(van Santvoord & Beek, 1994)によりタスクに応じた姿勢や操作の制御が示されているが、本研究では、それら先行研究とは異なる flow の制御が問題となり、スキルを必要とする知覚運動協調タスクであるけん玉の「ふりけん」を実験課題として行うこととした。けん玉は、日本でよく知られた遊びである。それにも関わらず、けん玉を上手に使いこなせる人はそう多くはない。それは、けん玉が多自由度をもっているからであろう。けんは手とつながっており、手の延長として考えることができるであろうが、玉は糸によってけんとつながっている。ゆえに、けん玉は多自由度をもつ物体であるといえる。加えて、第1章で述べたように、身体には膨大な数の自由度がある。けん玉は、多自由度をもつ身体とけん玉が制御される複雑なタスクである。けん玉をするときには、自分がけん玉を動かしているにも関わらず、けん玉はけん玉の運動をする。それゆえ、けん玉では、行為者と環境の双方が互いに運動し、制約し、制約され、予測不可能性をはらむ中で技が達成されている。つまり、けん玉は、変化する身体—環境系で成立する出来事であり、熟練者の知性、dexterity が顕在化しやすいタスクであると考えられる。

以下では、本研究におけるけん玉タスク「ふりけん」の説明と、ふりけんにおける姿勢について述べる。

けん玉の説明, ふりけんの説明

けん玉は、16世紀のフランスが発祥の地とされ、日本には、江戸時代中期にシルクロードを経由して長崎に伝えられたと言われている(日本けん玉協会, 2003)。世界には様々な形態のけん玉があるが、本研究では日本で通常用いられているけん玉を用いた(図 1)。日本では、このタイプのけん玉を使って、100以上の技が開発されている。100以上の技のうち、基本技と言われるものが10個ある。本研究では、基本技のひとつである「ふりけん」を実験課題として設定した。図 2 はふりけんの模式図である。ふりけんでは、最初に、図 2a に示されているように、行為者は試行を開始する準備をする(かまへの段階)。行為者が非利き手にもっている玉を放すと、玉がけんをもつ手を中心として動き始める。非利き手にもっているボールを放すときには、玉を押し出さない(図 2b)。次に、行為者は、玉が自分のほうに戻ってくるようにけんを引いて玉を返す(けんを持つ手や腕を行為者側に向かって引く)。そのとき糸がゆるみ、玉自体が回転を始める(図 2c)。回転を伴って放物運動をする玉がおおよそ1回転したところでけんを玉に入れることができれば、ふりけんが成功したことになる(図 2d)。行為者が非利き手にもつ玉を放してから(図 2b)回転する玉にけんを入れるまでの時間は、おおよそ1秒である。この、ふりけんという技は、基本技であり、熟達者が行った場合には9割以上の確率で成功する。一方、基本技ではありながら初心者にとっては成功させることが難しい技である。熟練者と初心者の姿勢と操作を検討する上で違いが明確になると考え、この技を実験課題とした。また、けんの皿に玉を乗せる技である大皿や中皿などの基本技よりも、成否の判別が容易であると考え、ふりけんという技を実験課題とした。



図1 けん玉.

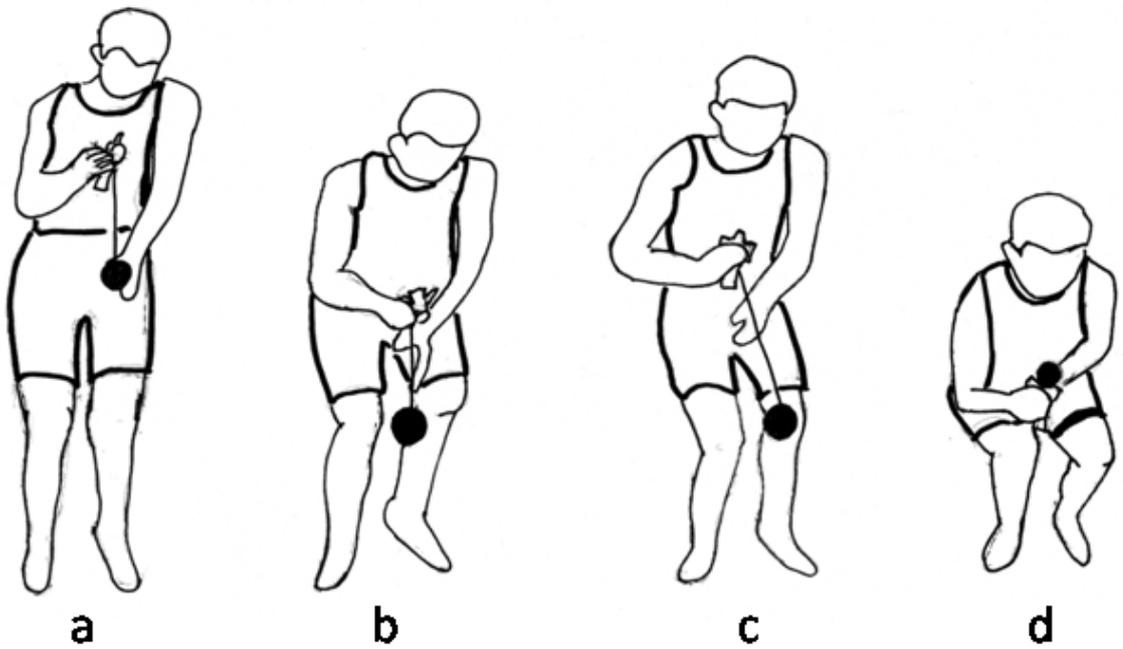


図2 ふりけんの模式図.

ふりけんにおける視知覚の制御

ふりけんでは、振り出した玉を返す行為者の運動により玉の運動が決定され、その玉を見てけんを玉の穴に入れる。したがって、どのように玉の軌道を生成するか、つまり操作が行為者の視知覚に影響を与える。けん玉をする各行為者がそれぞれ玉の運動を操作するわけであるが、エキスパートであっても毎試行正確に玉の軌道を再現するのは難しく、玉の運動は毎回微妙に異なりうる。しかも、ふりけんは1秒程度で終わる技である上に、回転を伴って落下する玉の穴にけんを入れなければならない。したがって、ふりけんの達成のためには、時空間的な制約が厳しく毎回異なって動く玉の知覚が問題となるであろう。特に重要なのは、ふりけんをする際に、回転を伴って運動する玉を視覚的に知覚することであろう。なぜなら、回転を伴って放物運動する玉にけんを差し入れなければならない局面では、行為者は物理的に玉の軌道を修正することができないからである。

ここで、ふりけんでは、視覚が特に重要となる局面に関して、第1章で記述した光学的情報との関係でふりけんを考えてみよう。ふりけんでは、玉を引いて以降は、玉が行為者側に対して放物運動をしながら接近し、同時に、玉自体が回転をしており、それら事象を特定する包囲光配列の局所的な流動(local flow)が生じる。さらに、けん玉では膝の運動が重要だと言われるが、ふりけんでは膝の運動が利用されるとすれば、観察点の変化によって包囲光配列の全体的な流動(global flow)が生じる。さらに各試行の最後には、けんをもつ手がそれらのflowの一部を削除しつつ、けんと玉との接触が生じる。したがって、ふりけんとは、local flow と global flow の制御を同時に行いながら、試行の最後に回転を伴って放物運動をする玉の穴にけんを入れる技だと考えられる。

global flow と local flow が生じているオプティック・フローを制御しながら、回転を伴って放物運動をする玉とけんとの接触があるふりけんという事象は、第1章のエコロジカル・アプローチの知覚情報研究として触れたタウの方略と関係が深いと考えられる。

光学的情報タウとは、光学的なパターンの拡大率であり、行為者と環境が接近するときの接触までの切迫度を特定する。ある接触事象において、行為者と環境との間隙を X があるとすると、 τ_x は、 X を X の変化率で除したものとして定義される。同時に 2 つ以上の接触事象が協調して制御される場合、それをタウカップリングと呼び、2 つの間隙 X, Y の τ には $\tau_y = k\tau_x$ という関係がある。ここで k は定数である。ふりけんにおいては、回転を伴って放物運動する玉の穴にけんを入れることになるので、それら 2 つの接触の制御が問題となるだろう。

本研究では、スキルの必要なタスクにおける姿勢制御の役割を明らかにするために、ふりけんにおける熟練者群と初心者群の姿勢制御を比較した。本研究では、頭部・腰・膝・足首を分析対象とする姿勢としてみなした。頭部は見ることに特に寄与する身体部位であり、頭部の運動は全身で調整される。下肢については、特に膝の運動に注目した。それは、けん玉をするときには膝の運動が重要であると経験的に言われているが、なぜ重要であるのか実証されていないからであり、また、わざの実行に直接的には関わっていないように思われる膝の運動は、姿勢をなしている一部分であると考えられたからであった。それゆえ、膝の運動がどのようにわざの成功に関わっているのかを検討した。また、これら姿勢に影響を与える玉の運動とふりけんを利用される視覚情報について検討した。

2.1 実験 1 方法

実験協力者

けん玉熟練者と初心者各 4 名, 合計 8 名が実験に参加した. 熟練者群の協力者(男性 4 名)は, 日本けん玉協会からけん玉の実力が卓越していると認定されていた(1 名が 8 段, 2 名が 6 段, 1 名が 5 段). 初心者群の協力者(女性 3 名, 男性 1 名)は, 実験以前にけん玉の経験があまりなく, ふりけんという技を知らなかった. 熟練者の 1 名が左利きであり, その他の協力者は右利きであった. すべての協力者は正常な視覚(矯正視力も含む)であった. すべての協力者から実験への参加について同意を得た.

器具

実験は, 奥行き 5m × 幅 4m × 高さ 3m の部屋で行われた. 部屋の後方の床にカラーテープを十字に貼り, 実験参加者にはテープの交差するところに前方を向いて立つよう教示した. 実験参加者の動作の計測のため, 6 台の赤外線カメラで構成される三次元動作計測装置(VICON460, Vicon Motion Systems 社製)を用いて, サンプル周波数 120Hz で計測した. 実験参加者には身体各部に赤外線カメラ用のマーカをつけてもらったが, 身体に取り付けたマーカのうち解析に使用したのは, 各実験参加者の利き手側の頭部(国際 10-20 法の Fp1 あるいは Fp2)・腰(腸骨稜)・膝(膝関節の大腿骨)・足首(外果)のマーカであった. 玉の運動を分析するため, 玉に三次元動作計測装置の赤外線カメラに反応する反射テープを貼り付けた. 玉の回転を記録するため, 玉の上側の糸が出ている細い隙間に鋼線(長さ 6.8cm, 太さ 1.5 mm)をさしこみ, 鋼線の先に, 玉に使用したものと同様の反射テープを貼り付けた発泡スチロール球(直径 19 mm)をとり付けた. けんの向きを計測するため, けん先に反射テープを貼り, けんの中皿にマーカをつけた. けん玉(玉の直径 6cm, 穴の直径 2cm)は, 日本けん玉協会の認定けん玉を用い, 実験参加

者が報告した利き手に合わせたものを使用した。

教示

初心者群の実験参加者には、まず、ふりけんをする際に推奨されるけんのもち方である「けんグリップ」を教示した(図 3)。それから、けんグリップでけん玉をもった実験参加者に対して、図 2a, b, c, d のような 4 枚の静止画を提示し、どのようにふりけんをするのかを教示した。教示後、初心者がふりけんの仕方を理解したかどうかを確認するため、何回かふりけんをしてもらった。熟練者群については、ふりけんの仕方をすでに知っていたため、教示しなかった。

マーカを取り付けられた実験参加者は、所定の位置に立ち、1 セット 20 回のふりけん試行を 10 セット(合計 200 回)行った。セット間には 1 分程度の休憩をはさんだ。



図 3 けんグリップ。

分析方法

データの分析に際して、試行の開始を非利き手でもっている玉を放し始めたところとし、試行の終了を振り出した玉が身体側に返ってきて玉とけんが接触したところとした。初心者群では、試行の最後に玉とけんとの接触がなかった試行が計 29 試行(初心者 1 は

11 試行, 初心者 2 は 11 試行, 初心者 4 は 7 試行)あった. そのような試行は, 試行の終わりを特定するのが困難だったため, 解析対象外とした. 合計で熟練者群の 800 試行, 初心者群の 771 試行を解析対象とした. ふりけんでは, 左右方向への身体運動はあまりなかったもので, 前後方向 (anterior-posterior displacement) と上下方向 (vertical displacement) の運動を分析することにした. 統計解析をする際には, 学習の効果を検討しやすくするため, 各実験協力者の最初の 40 試行(1 セット目と 2 セット目; Block A とする), 真ん中の 40 試行(5 セット目と 6 セット目; Block B とする), 最後の 40 試行(9 セット目と 10 セット目; Block C とする)を解析対象とした.

玉の運動.

姿勢制御に影響を与えるであろう玉の軌跡に見られるスキルの差を確認するため, 最初に, 空間に固定された座標系で任意の一点を原点として玉の軌跡を調べた. 次に, 実験協力者の頭部を中心とした座標系での玉の軌跡を調べた. これは, 熟練者群のみ, その試行の成否に関わらず常に, 玉が彼らの頭部の前に近づいた状態で, ふりけん試行を終了させていたことが観察されたからであった. 頭部を座標系の中心とした玉の軌跡により, 頭部の運動と玉の運動との関係を捉えられるであろう. 比較のため, 座標の原点を腰・膝・足首とした場合の相対的な玉の軌跡も同時に調べ, 各座標系において, 試行の最終時点における玉の軌道のばらつきを評価した. 玉の軌道のばらつきは, 各座標系で各ブロックにおける玉の軌道の最終時点の座標 SD を算出した. ただし, SD を求める際の平均値は各セットのデータを用いた. 算出された SD のデータに対し, 混合モデルを用いた Group(熟練者/初心者)×Blocks(A, B, C)×座標中心(環境/頭部/腰/膝/足首)の分散分析を行った.

ふりけんをするときには, 玉は 2 種類の運動を行うと考えられる. 行為者が玉を振り出すと, 玉はけん(手)を中心として振り子状に運動し, その後, 行為者が自分の身体側に腕

や手を引くと(「玉を返す」と言われる), 糸の張力がきれて糸が緩んだ状態で, 玉は放物運動をする. これを本研究では玉の公転とする. 一方, 行為者が自分の身体側に腕や手を引くと, 玉は等速で回転を始める. これを玉の自転とする. 玉は回転を伴って動く. 玉の回転については, その回転角を図4のように設定した. 各試行のはじめ, 回転角の全参加者平均は 46.43° であった. 試行が開始すると, 玉は開始位置の角度から 90° へ, 90° から 135° へとその角度を変化させていく. ふりけんを成功させるためには, 玉が試行の最後に 360° から 450° の位置にあることが必要になる. このため, 実験協力者が玉を 1 回転させることができていたのか, 各試行の最終時点での回転角を調べた. 玉の回転角は, 通常, 各試行の最後で最大になっていたので, 各ふりけん試行の最後での玉の角度を調べることにより, 玉が 1 回転していたのかどうかを確認することが可能であった.

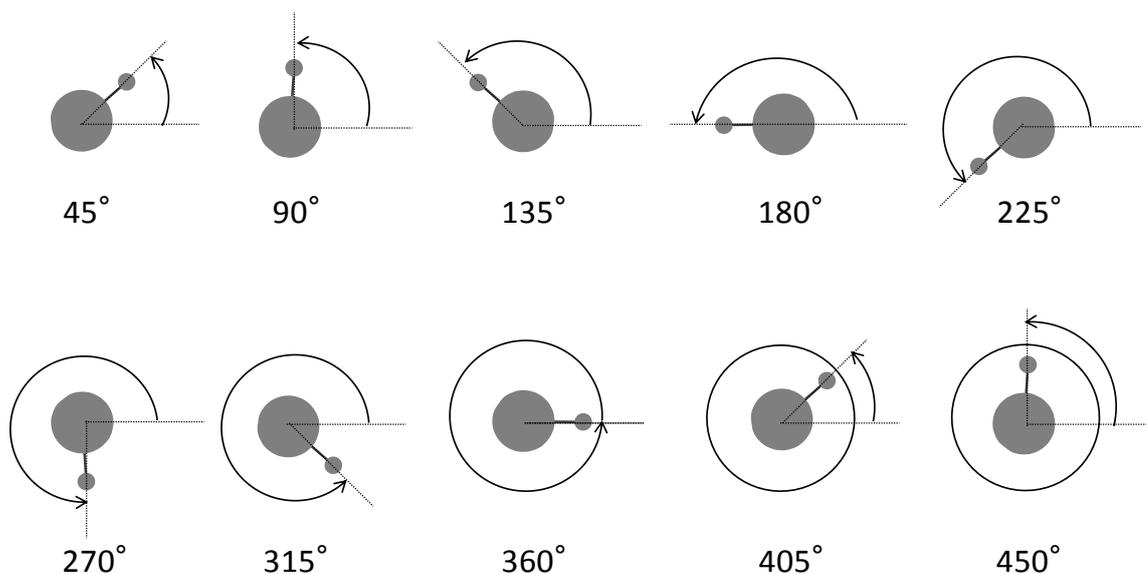


図 4. 玉の回転角. 実験協力者の右側から見た場合を示す. 灰色の大きな丸はけん玉を, 灰色の小さな丸はデータ記録用に取り付けた反射テープが貼付された球.

身体運動.

姿勢制御を評価するにあたり, 頭部の運動と脚の運動を調べた. 頭部の運動については, 前後方向と上下方向での各試行の平均速度(mm/s)を計算した. 脚の運動については,

各試行の膝の運動の平均角速度(degrees/s)を計算した。これらの値を各試行について計算した。算出された各値を用いて、混合モデルを用いた Group(熟練者/初心者)×Blocks(A, B, C)の分散分析を行った。

玉と身体とのカップリング

相互相関(CCF) 玉と身体(頭部, 腰, 膝, 足首)との関係を評価するため, CCF を実行した。前後方向と上下方向のそれぞれについて, 実験参加者ごとに各試行で相互相関の絶対値の最大値を求め, それを最大相互相関とした。算出した値に対して, 混合モデルを用いた Group(熟練者/初心者)×Blocks(A, B, C)×Body(頭部/腰/膝/足首)の分散分析を行った。また, 相互相関の絶対値が最大値をとるときのラグを検出した。ラグによって玉の運動と身体の運動のどちらが先行しているのかを明らかにすることができた。なお, ラグは正の符号をとるときに玉のほうが先行している(身体のほうが遅れている)ことを示す。

Cross Recurrence Quantification Analysis(CRQA) 玉と身体との関係を評価するにあたり, CCFの分析に加え, CRQA を実行した。CRQA とは, 非線形時系列解析手法であり, 再構成された状態空間における位置の共有状況を検討するものである(野中, 西崎, 佐々木, 2010)。本研究の初心者群においては, 姿勢は静的なものであるにも関わらず, 上下方向の玉と頭部, 玉と足首との最大相互相関は, 高い相互相関係数が得られていた。実際にこの値には意味があるのか, さらには, 線形解析では捉えきれない玉と身体との関係を検討するため, この解析を行った。CRQA を実行するにあたり, まず各時系列データを標準化した。実行する際のパラメータは, 次元を 5, 時間遅れを 10 ポイント(0.083 秒), 状態空間上の距離の半径を 35%とした。時間遅れの設定は, その時系列が最も独立する(相関が小さい)ポイントを選択すべきであるが, 本研究では各試行が 1 秒程度あり, 時間遅れの選択は極めて重要というわけではない(Shockley, Santana, &

Fowler, 2003; Webber & Zbilut, 2005)ため、この時間遅れを選んだ。本研究の目的のために、%REC と MAXLINE という 2 つのリカレンス変数が計算された。%REC は、再構成された状態空間において 2 つの時系列が共有可能な位置の数に対して実際に共有された位置の数の比である。MAXLINE は 2 つの時系列に共有された最も長い軌跡として定義される。%REC は玉と身体との間で共有された活動の割合の指標として、MAXLINE は玉と身体がどれくらいの間同じパターンを維持していたのかを示す指標として用いた (Shockley, 2005; Shockley, Baker, Richardson, & Fowler, 2007; Shockley et al., 2003)。各試行で算出された %REC と MAXLINE のデータに対し、混合モデルを用いた Group(熟練者/初心者)×Blocks(A, B, C)×Body(頭部/腰/膝/足首)の分散分析を行った。

Variable error によるばらつきを検討 熟練者群のみに観察された各試行の最終フェーズにおける頭部と玉との位置の一貫性について調べるため、各実験協力者の各試行の最後での頭部と玉との距離と方向を算出した。この際、計測不良により、熟練者 1 の 4 試行と熟練者 3 の 2 試行を解析対象としていたデータから外した。各試行において計算された頭部と玉との距離、方向のデータを用いて、各実験協力者の各ブロックについて Variable Error(VE)を計算した。比較のため、腰・膝・足首それぞれと玉との距離と方向についても VE を調べた。VE_{distance} は、以下のように算出された。

$$VE_{\text{distance}} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - M)^2}{n}} \text{ (mm)}$$

ここで、 x_i は所与の試行における玉と身体(頭部/腰/膝/足首)との距離、 M は所与のブロックでの玉と身体との距離の平均、 n はデータの個数を示している。VE_{direction} についても同様に算出した。なお、VE が小さいほうが、各試行の最後における玉と身体との距離について一貫していたことを示す。玉と身体との距離および方向の VE(VE_{distance},

VE_{direction})について、各実験参加者のブロックごとの平均値のデータを用いて、混合モデルを用いた Group(熟練者/初心者)×Blocks(A, B, C)×Body(頭部/腰/膝/足首)の分散分析を行った。

タウカップリング

本研究では、ふりけんにおける視覚情報を検討するために、タウカップリングの分析を行った。ふりけんでは、回転を伴って放物運動をする玉とけんとの接触が生じる。そのため、自転の τ と公転の τ を協調させて同時に制御すると考えられる。自転のタウ(τ_a)は、けんの向きと玉の穴の向きのなす角度のタウであり、ある時点 t での τ_a は、 t におけるけんの向きと玉の穴の向きのなす角度をその角度の変化率で除算することで得られた。公転(τ_d)のタウは、玉とけん先の距離のタウであり、ある時点 t での τ_d は、 t における玉とけん先との距離をその距離の変化率で除算したものであった(図5)。タウカップリングの理論(Lee, 1998)によれば、本研究での τ_a と τ_d との関係は、次のように示すことができる。

$$\tau_a = k\tau_d$$

ここで、 k はふりけんにおけるカップリング定数である。この k は、カップリングする τ_a と τ_d の情報であるとともに、運動の特徴を示すものであり、運動タスクにおいて適切な値にセットされるものであると言われている(Lee, 1998; Lee, Craig, & Grealy, 1999)。本研究では、ふりけんでは利用される情報への姿勢の影響を考慮するために、玉とけん先との距離を視角の公式を用いて補正し、算出した²。補正した公転の τ を $\tau_{d(local)}$ とした。自転に対する視線の影響は、本実験では視線の計測を行わなかったため考慮せず、実験参

² 視角の公式は次のとおりである (V は視角, S は視角を占める対象物の幅, D は対象物までの奥行き):

$$V = 2\arctan(S/2D)$$

ここで、玉とけん先との単純な物理的距離ではなく、頭部(観察点)の位置を考慮した上での玉とけん先の距離を算出するため、次のような計算を行った。頭部を頂点とし、玉と頭部とけん先のなす角度を V に代入し、また、玉とけん先の中点と、頭部との距離を D に代入した。このようにして、頭部の位置を考慮したかたちで補正された玉とけん先の視覚的距離 S が得られた。

加者は概ね玉を注視できているとの仮定の下に分析を進めた。なお、解析の際には、ノイズが多いため、各試行の最後 3 ポイント(0.025 秒)のデータを除いた。

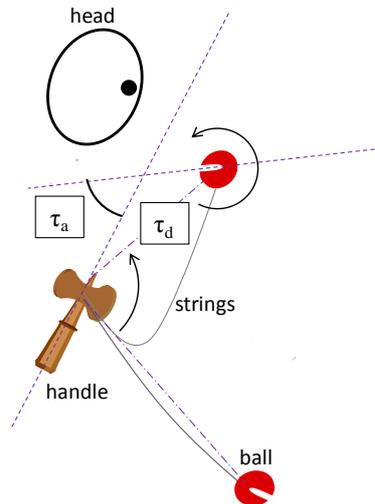


図 5 ふりけんにおける τ_a と τ_d . τ_a はけんの向きと玉の穴とがなす角のタウである. τ_d はけん先と玉との距離のタウである.

タウカップリングしていた試行数 本研究では、熟練者群では 2 つの τ が各試行の最終フェーズでカップリングしているが、初心者群ではそうではないと考えられたため、まず、実験協力者の各試行においてタウカップリングしていたか否かを判断し、その試行数を数えた。タウカップリングしているときには、2 つの τ の時系列による回帰直線の決定係数が高くなる。本研究では、先行研究(Lee Georgopoulos, Clark, Craig and Port, 2001)にならい、 τ_a と $\tau_{d(local)}$ の線形回帰の決定係数が 95%以上になる区間の有無を調べた。 τ_a と $\tau_{d(local)}$ がカップリングしている区間の検出は、次のように行った。まず、本研究が実験課題とするふりけんでは、試行の最後に公転と回転のタウカップリングが検出されると考えられるため、 τ_a と $\tau_{d(local)}$ の時系列の最後 10 ポイントのデータ系列を用いて、線形回帰にあてはめた。次に、各時系列の最後の 11 ポイントのデータ系列を用いて、線形回帰をあてはめた。このように、試行の最後のデータ系列を 1 ポイントずつ加えていき、線

形回帰をあてはめていった。タウカップリングの区間は τ_a と $\tau_{d(local)}$ のグラフの決定係数が 95% を超え、かつ、最もデータ系列が長くなる区間とした。また、けんとうとの接触時には、公転と自転の 2 つの gap は 0 になり、 τ は理論上 0 になる。ただし、本研究では計測上 2 つの τ は 0 付近になるので、熟練者群の成功試行で 2 つのタウの時系列による決定係数が 95% 以上になる区間が検出された試行を用いて、その試行の τ_a の時系列最終ポイントの値を求め、最終時点での τ_a の値が基準とする値の範囲内に収まることも、タウカップリングしていたとみなす条件とした。タウカップリングしていたとみなされた試行数とみなされなかった試行数の比率が両群で異なるかをカイ 2 乗検定によって調べた。

区間ごとの k による運動の変化の検討 リーチング課題におけるタウカップリングを検討した Smith, Grealy, & Pepping(2014) の研究では、運動の性質を示すカップリング定数 k の値が、タスクの条件によって変化するのか、リーチングのフェーズによって k の値が異なるのかどうかを調べた。その結果、上記のような方法でタウカップリングの区間を求め、そのときの回帰直線の傾きを k とした場合には、タスクの条件によって k の値には有意差が認められなかった。一方、リーチングをフェーズわけして k の値を調べたところ、 k の値とそのばらつきはタスクの条件によって異なっていることが明らかになった。この分析は、タウカップリングしているとみなされたデータが本実験の初心者群では少なかったため、熟練者群のみを対象とした。熟練者群のけんとうと玉とが接触する直前の時系列を 4 つの区間に分け、各区間での k の値を算出した。4 つの区間は、接触 0.20 秒前(0.225 秒前～0.175 秒前)、接触 0.15 秒前(0.175 秒前～0.125 秒前)、接触 0.10 秒前(0.125 秒前～0.075 秒前)、接触 0.05 秒前(0.075 秒前～0.025 秒前)とした。 k の値は、各区間の τ_a と $\tau_{d(local)}$ の時系列データを直線回帰にあてはめたときの傾きとした。対象とする区間の上限は、タウカップリングしていた熟練者群におけるタウカップリングしているとみなされた区間の平均が 0.17 秒であったことを踏まえて決定した。このようにカ

カップリングが開始されるであろうタイミングの前後に区間を設けることによって、 k の値に運動の質的な変化があらわれると考えられた。また、各熟練者で set ごとに k の値の SD を算出し、各区間で k の値のばらつきに差があるのか検討した。 k の値と SD の値の評価は、混合モデルを用いてカップリング区間を要因とする分散分析によって行った。

2.2 実験 1 結果

熟練者群では、全試行のうち 90%以上の試行でふりけんを成功させていた(成功試行数はそれぞれ、熟練者 1 が 193 試行、熟練者 2 が 199 試行、熟練者 3 が 180 試行、熟練者 4 が 195 試行)。初心者群には成功試行はなかった。

1 試行に要した時間の平均は、熟練者群で 1.19 s ($SD = 0.06$)、初心者群で 1.02 s ($SD = 0.21$)であった。試行に要した時間の平均は、熟練者群のほうが初心者群よりも長かった [$t(6) = 2.67, p < .01$].

玉の運動

玉の軌跡.

各群の典型例として熟練者 2 と初心者 3 の代表的な玉の軌跡(1 セット分; 20 試行)を、空間中のある一つの点を基準とした座標系(「空間座標系」と呼ぶ)において示した(図 6)。熟練者群では玉の軌跡が前後方向と比較して上下方向に長い一方で(図 6, 上)、初心者群の玉の軌跡は逆のパターンを示しており、垂直方向よりも前後方向に長くなっているようであった(図 6, 下)。この点について縦横比(縦/横)を算出して検討したところ、熟練者群の縦横比の平均は 2.56($SD = 0.26$)で、初心者群の縦横比は 1.06($SD = 0.18$)であり、熟練者群のほうが縦に長い軌道であった [$t(6) = 10.1, p < .001$]. また、両群では、試行間の玉の軌跡の変動性にも違いが見られた。熟練者群の玉の軌跡は初心者群と比較して試行毎の再現性が高く、試行間の変動性が小さい傾向があった。しかしながら、一試行内での軌跡の変動に注目すると、熟練者群では、試行の最終フェーズ(けん玉がささる直前)では相対的に玉の軌跡の変動性が大きくなっていると考えられた。

図 7, 8 は、図 6 と同じ軌跡データを、身体の 4 つの部位(頭部・腰・膝・足首)を座標系の基準とした場合の表示である。したがって、図 7, 8 には座標の原点となっている身

体部位の運動と玉の運動との関係性が反映されている。質的に見てみると、図 7 に示された典型例のように、熟練者群においては、頭部を座標の中心とした場合の玉の軌跡の大きさ (図 7A) は、空間座標系における玉の軌跡 (図 6 上) よりも小さかった。腰を原点とした場合の玉の軌跡の大きさも (図 7, B)、空間座標系における玉の軌跡よりも小さかった。膝を座標の中心とした玉の軌跡 (図 7, C) は、空間座標系における玉の軌跡よりも前後軸において小さく、右に傾いていたが、頭部や腰を座標の原点とした玉の軌跡と比べると垂直軸においては大きさがあまり変わっていなかった。足首を座標の中心とした玉の軌跡 (図 7, D) は、空間座標系における玉の軌跡と比較して大きさはあまり変化していなかった。

図 6 における玉の軌跡の特徴のひとつは、両群において共通しているが、最終フェーズでの変動性が相対的に大きいことであった。この点を考慮すると、図 7 における熟練者の相対的な玉の軌跡には著しい変化があった。最終フェーズでの変動性は、頭部または腰を中心とした玉の軌跡では見られなくなった (図 7, A; 図 7, B)。特に頭部を原点とした座標系で顕著であるが、空間座標系での玉の軌跡の最終フェーズで玉が下向きに落ちている部分が消えていた。一方、膝または足首を中心とした玉の軌跡においては変動性の変化は頭部や腰ほど見られなかった (図 7, C; 図 7, D)。

初心者群の頭部・腰・膝・足首を座標の中心とした場合の玉の軌跡を質的に見てみると、図 6 の下側で示した空間座標系での玉の軌跡にいずれも類似していた (図 8ABCD)。初心者群においては、熟練者群とは異なり、頭部あるいは腰を中心とした座標系における最終フェーズでの軌跡のばらつきの相殺がみられないと考えられた。

上記の各座標系におけるふりけん最終フェーズでの試行のばらつきについて定量的に検討するため、各座標系の玉の軌跡において、各ブロックの最終ポイントの *SD* に対し混合モデルを用いた Group (熟練者/初心者) × Blocks (A, B, C) × 座標中心 (環境, 頭部, 腰, 膝, 足首) の分散分析を行った。その結果 Group, Blocks, 座標中心の主効果と Group ×

座標中心の交互作用が有意であった[それぞれ $F(1, 6) = 51.37, p < .001$; $F(2, 12) = 17.20, p < .001$; $F(4, 24) = 34.06, p < .001$; $F(2, 12) = 8.69, p < .001$]. 単純主効果の検定から、すべての座標中心について熟練者群のほうが初心者群よりも SD 値が小さく ($p < .001$), 各群での座標中心の単純主効果の検定は、熟練者群と初心者群の両群で、座標中心によって SD の値が異なることを示した[それぞれ $F(4, 24) = 33.10, p < .001$; $F(4, 24) = 9.65, p < .001$]. 熟練者群では、頭部座標系の SD が他の座標中心のそれよりも小さく、腰座標系の SD は環境座標系と膝座標系系と足首座標系のそれより小さかった ($p < .01$). 初心者群では、頭部座標系の SD が腰・膝・足首座標中心のそれよりも小さく ($p < .05$), 環境座標系のそれより小さい傾向があった ($p < .10$). したがって、検定結果をまとめると、環境座標系の玉の軌道の最終ポイントでのばらつきは、熟練者群の方が初心者群よりも小さかった。各群で環境座標系の玉の軌道の最終ポイントでのばらつきが異なるので、各群での座標系のばらつきについて着目すると、熟練者群では、頭部座標系のばらつきがもっとも小さく、次いで腰座標系が小さく、膝と足首と環境座標系のばらつきには違いが認められなかった。一方、初心者群では、頭部座標系の SD がその他身体部位の座標系のそれよりも小さく、環境座標系のばらつきよりも小さい傾向があった。頭部以外の身体部位の座標系の SD については、環境座標系の SD と違いは認められなかった。

以上、質的な分析と統計解析の結果を要約する。熟練者群の空間座標系での玉の軌跡の質的な分析では、初心者群と比べて試行間での再現性が高かった。しかし、軌跡の部分に着目すると、熟練者群においても、最終フェーズにおいては空間座標系での玉の軌跡の変動性は相対的に大きかった。これに対して、頭部や腰を中心とした座標系に置き換えると、熟練者群においては、玉の軌跡自体が小さくなるとともに、最終フェーズでの変動性が小さくなっていた。質的な分析結果について確認するため、各座標系(環境・頭部・腰・膝・足首)での試行の最後のばらつきを統計的に検討した。その結果、熟練者

群の方が初心者群よりも試行の最終ポイントにおける環境座標系の玉のばらつきが小さく、熟練者群では環境座標系と膝、足首を中心とする座標系の玉のばらつきよりも頭部、腰を中心とする座標系の玉のばらつきが小さかった。また、熟練者群では頭部座標系の SD のほうが腰座標系のそれよりも小さかった。一方、初心者群では、頭部座標系の玉の運動の SD が他の身体部位の座標系のそれよりも小さく、環境座標系のそれよりも小さい傾向にあった。これは、熟練者群の頭部や腰の運動が、身体に対する玉の運動のばらつきを相殺するような働きをもっており、初心者群の頭部運動が玉の運動のばらつきを相殺するような働きをもつ傾向があったことを示唆する。

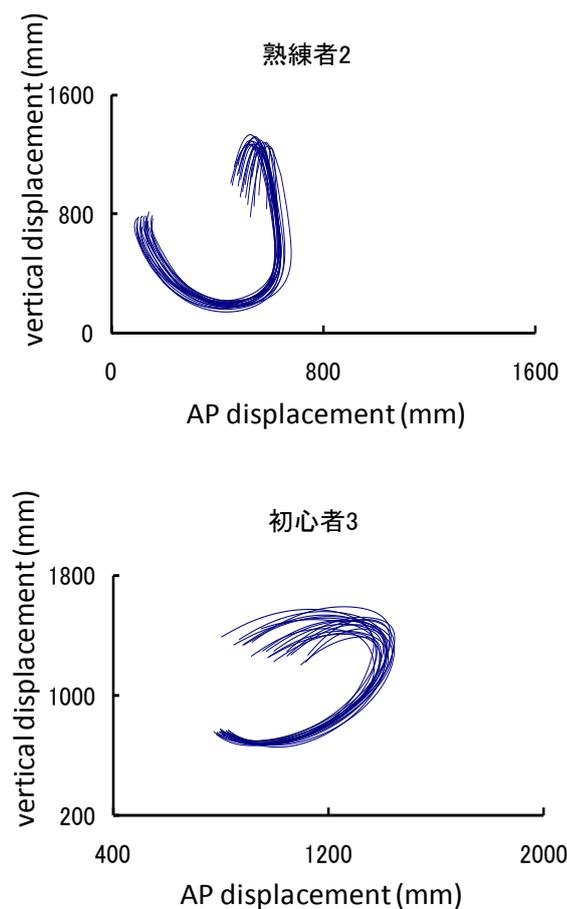


図 6 任意の座標系における玉の軌跡の典型例。横軸が前後方向(AP displacement)、縦軸が上下方向(Vertical displacement)を示す。上側が熟練者、下側が初心者。

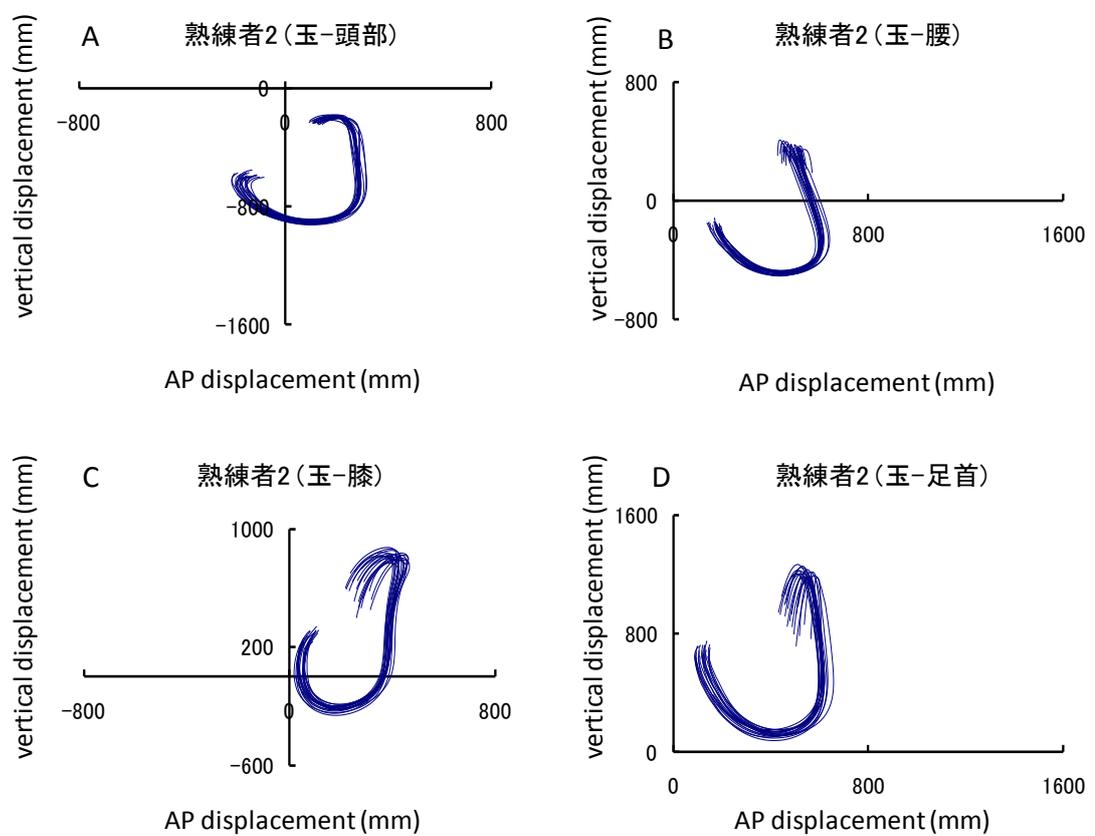


図 7 熟練者の身体各部を座標と原点とした玉の軌跡の典型例。横軸が前後方向(AP displacement), 縦軸が上下方向(Vertical displacement)を示す。各軌跡における座標の原点は A:頭部, B:腰, C:膝, D:足首である。

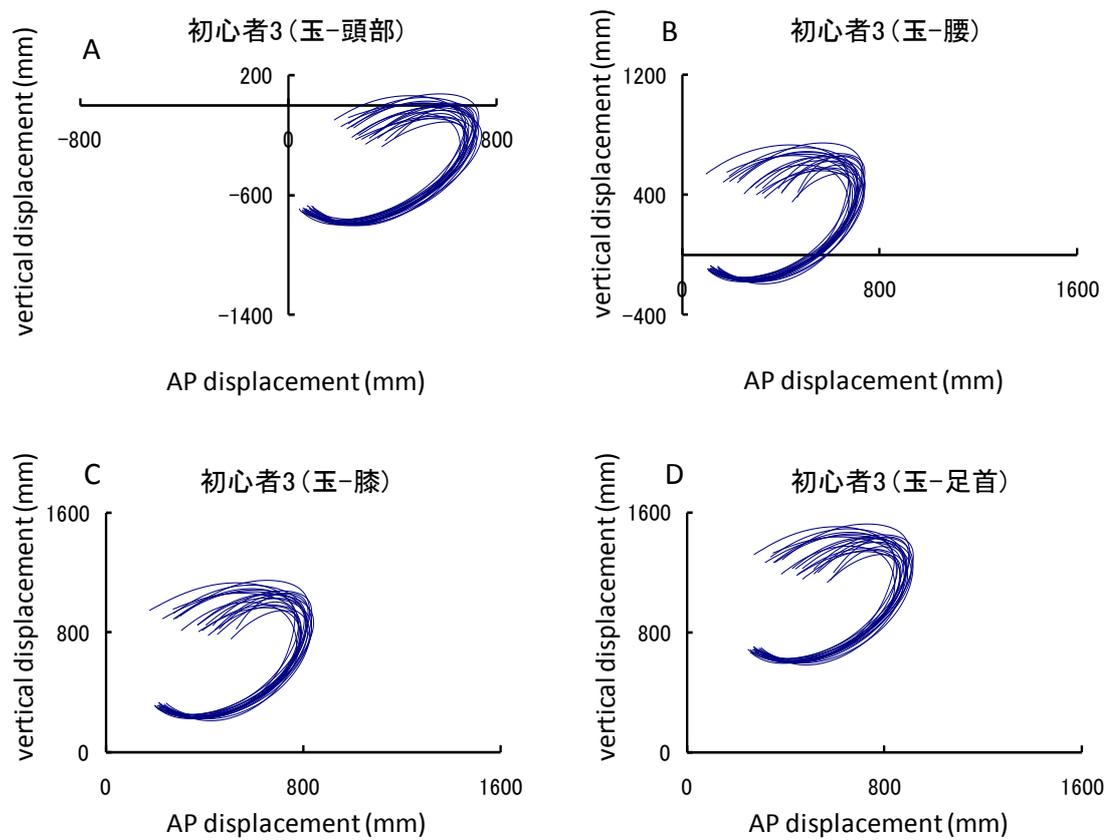


図 8 初心者の身体各部を座標と原点とした玉の軌跡の典型例. 横軸が前後方向(AP displacement), 縦軸が上下方向(Vertical displacement)を示す. 各軌跡における座標の原点は A:頭部, B:腰, C:膝, D:足首である.

玉の回転.

各試行の最後での玉の回転は重要である。もし実験参加者がふりけんを成功させようとするならば、各試行の最後に玉の回転角が $360^\circ \sim 450^\circ$ になっている必要があった。熟練者群では、分析可能な 791 試行のうち、ふりけん成功した 769 試行と失敗した 20 試行(99.7%)において、玉の回転角が 360° から 450° のあいだにあった。熟練者 3 のふりけん失敗した 2 試行においてのみ、玉の回転角が 360° より小さかった。これに対して、初心者群では、解析可能であった 746 データのうち、52 試行(6.97%)のみ、 360° から 450° の範囲にあった(初心者 1: 29 試行, 初心者 2: 1 試行, 初心者 3: 14 試行, 初心者 4: 8 試行)。これらの結果は、熟練者群では、ほとんど常にボールが 1 回転していたが、初心者群では玉が 1 回転していることがあまりなかったことを示す。

身体運動

頭部運動.

頭部運動については、熟練者群では、各試行の最初に頭部が下方向に動き、それから上に、そして再び下に動いた。一方初心者群では、頭部が上下方向に熟練者のようには動いていなかった。

頭部運動の前後方向と上下方向のそれぞれについて、混合モデルを用いた Group (expert, novice) \times Blocks (A, B, C) の分散分析を実行した。前後方向の頭部運動については、Group の主効果が有意と、Blocks の主効果が有意傾向にあった[それぞれ $F(1, 6) = 4.85, p < .10$; $F(2, 12) = 3.50, p < .10$]。多重比較の結果、Block A のほうが Block C よりも前後方向の頭部運動が大きい傾向にあった($p < .10$)。Group と Blocks の交互作用は有意ではなかった。上下方向の頭部運動については、Group の主効果が有意であった[$F(1, 6) = 47.83, p < .001$]。Blocks の主効果と Group と Blocks の交互作用は有意ではなかった。これらの結果は、熟練者群の頭部運動が初心者群よりも上下方向で大きく、前後方

向でも大きい傾向にあったことを示している(図 9).

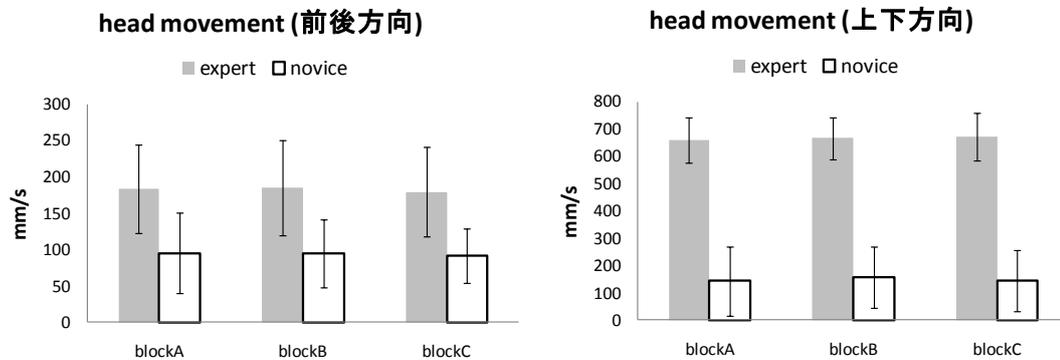


図 9 実験参加者の頭部運動. エラーバーは標準偏差を示す.

膝の運動.

熟練者群の実験参加者は、各試行の最初に膝を曲げ、それから膝を伸ばし、再び膝を曲げていた。初心者群については、熟練者群ほど膝を曲げていなかった。頭部運動と同様に膝の運動の平均角速度に対して、Group と Blocks を要因とし、混合モデルを用いた分散分析を膝の平均角速度に対して行った。その結果、Group の主効果が有意であった [$F(1, 6) = 45.89, p < .001$]. Blocks の主効果と Group と Blocks の交互作用は有意ではなかった。これらの結果は、熟練者群のほうが初心者群よりも膝の運動が大きかったことを示す(図 10).

以上の身体運動のデータの結果をまとめると、頭部の運動と膝の運動ともに、熟練者群のほうが初心者群よりも大きかったと言える。

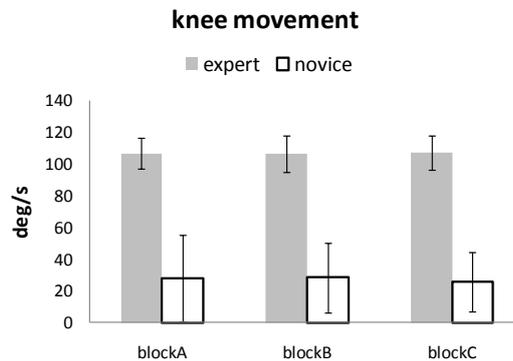


図 10 実験参加者の頭部運動. エラーバーは標準誤差を示す.

玉と身体とのカップリング

相互相関.

運動する玉と姿勢制御の関係を評価するために、玉の運動と姿勢(頭部・腰・膝・足首)のそれぞれについて、相互相関の絶対値が最大となる値を求め、それを最大相互相関とした。図 11 は前後方向の、図 12 は上下方向の各群における CCF の値を示している。上下方向と前後方向のそれぞれの最大相互相関について、混合モデルを用いた Group (熟練者/初心者)×Blocks (A/B/C)×Body (玉-頭部/玉-腰/玉-膝/玉-足首)の分散分析を行った。

前後方向の玉と身体との最大相互相関. 3 要因の分散分析の結果、Block, Body の主効果, Group×Body の交互作用, Group×Block×Body の交互作用が有意であった[それぞれ順に, $F(2, 12) = 5.38, p < .05$; $F(3, 18) = 89.645, p < .001$; $F(3, 18) = 32.46, p < .001$; $F(6, 36) = 6.41, p < .001$]. そこで、各 Block について Group×Body の分散分析を行った。その結果、Block A では Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 44.17, p < .001$; $F(3, 18) = 14.28, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果、Block A においては、腰についてのみ Group による差があり、熟練者群のほうが相互相関が大きかった ($p < .05$). 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なり [$F(3, 18) = 54.47, p < .001$], 腰は他の 3 部位よりも玉との相互相関が大きかった ($p < .001$). 初心者

群でも Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 6.06, p < .01$], 腰は頭部よりも大きく ($p < .05$), 足首より大きい傾向があった ($p < .10$). Block B についても Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 57.95, p < .001$; $F(3, 18) = 11.29, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果, 身体の各部位について, Group による有意差は認められなかった. 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 42.62, p < .001$], 腰は他の 3 部位よりも玉との相互相関が大きく ($p < .001$), 頭部は足首より大きく ($p < .05$), 膝は足首よりも大きい傾向があった ($p < .10$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 27.18, p < .001$], 腰は他の 3 部位よりも玉との相互相関が大きく ($p < .05$), 膝と足首は頭部より大きかった ($p < .05$). Block C については, Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 67.81, p < .001$; $F(3, 18) = 20.14, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果, 各身体部位における Group の効果については, 頭部についてのみ, 熟練者群のほうが初心者群よりも最大相互相関が大きかった ($p < .01$). Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 40.74, p < .001$], 腰は他の 3 部位よりも玉との相互相関が大きく ($p < .001$), 頭部は足首より大きかった ($p < .01$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 46.98, p < .001$], Block B と同じで, 腰は他の 3 部位よりも玉との相互相関が大きく ($p < .05$), 膝と足首は頭部より大きかった ($p < .05$).

前後方向の CCF についてまとめる. 各身体部位への Group の効果に着目すると, Block A では腰について, Block C では頭部について, 熟練者群の CCF ほうが初心者群よりのそれも大きかったが, 各 Block でその身体の部位については CCF に差が認められなかった. 各群での身体部位による CCF の違いに着目すると, 熟練者群も初心者群も, 腰と玉との CCF が分析したその他の身体部位での CCF よりも大きい傾向にあった. 前後方向の腰の運動は, 振り出す際の玉の軌道を作り出す腕や手の動作に他の解析部位よりも影

響を受けるかもしれず、そのため両群とも腰と玉との相関が他部位と玉とのそれよりも高い可能性があるだろう。一方、熟練者群では頭部と玉との CCF が足首のそれよりも大きかったのに対し、初心者群では Block B と Block C では膝と玉、足首と玉との相互相関が頭部と玉とのそれよりも大きかった。

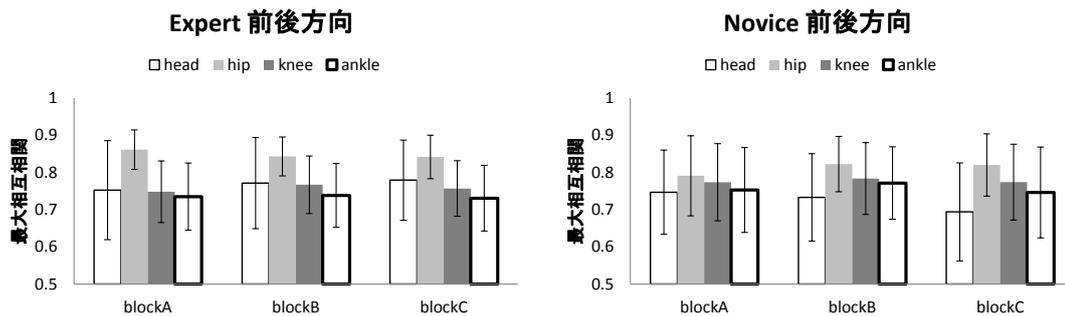


図 11 前後方向の最大相互相関. 左側が熟練者群を、右側が初心者群を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

上下方向の玉と身体の最大相互相関. 3 要因の分散分析の結果, Block, Body の主効果 [$F(2, 12) = 7.69, p < .01$; $F(3, 18) = 458.66, p < .001$], Group \times Block, Group \times Body, Block \times Body の交互作用 [$F(2, 12) = 27.78, p < .001$; $F(3, 18) = 217.82, p < .001$; $F(6, 36) = 4.17, p < .001$], Group \times Block \times Body の交互作用 [$F(6, 36) = 6.02, p < .001$] が有意であった. そこで, 各 Block において Group \times Body の分散分析を行った. その結果, Block A では, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 172.87, p < .001$; $F(3, 18) = 62.39, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果, 頭部・腰と玉との相互相関は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく, 足首については初心者群のほうが熟練者群よりも大きかった ($p < .05$). Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 196.06, p < .001$], 頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との相互相関が大きかった ($p < .001$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっていたが [$F(3, 18) = 46.09, p < .001$], 熟練者群とは異なり, 頭部は

その他の部位よりも、足首は膝よりも玉との相互相関の値が大きかった($p < .01$). Block B でも、Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 131.07, p < .001; F(3, 18) = 115.71, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果は Block A と同じで、頭部・腰と玉との相互相関は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく、足首については初心者群のほうが熟練者群よりも大きかった($p < .05$). Group による Body の効果については、熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 207.22, p < .001$], Block A と同様に、頭部、腰、膝、足首の順で玉との相互相関の値が大きかった ($p < .001$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっていたが [$F(3, 18) = 45.44, p < .001$], 熟練者群とは異なり、頭部と足首が腰と足首よりも玉との相互相関の値が大きかった($p < .001$). Block C でも、Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 176.21, p < .001; F(3, 18) = 63.02, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果は、頭部・腰と玉との相互相関は熟練者群のほうが初心者群よりも大きかった ($p < .05$). Group による Body の効果については、熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 194.03, p < .001$], Block A, Block B と同様に、頭部、腰、膝、足首の順で玉との相互相関の値が大きかった($p < .001$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっていたが [$F(3, 18) = 50.42, p < .001$], 熟練者群とは異なり、頭部は他の 3 部位より大きく ($p < .01$), 足首は腰よりも玉との相互相関の値が大きい傾向があった($p < .10$).

上下方向の CCF の結果を要約すると、熟練者群では、相互相関の絶対値が最大をとる値は、頭部、腰、膝、足首の順で玉との相関が高くなっており、かつ、初心者群よりも頭部、腰と玉との最大相互相関が大きく、膝と玉との最大相互相関は 2 群で差が認められず、玉と足首の最大相互相関は初心者群よりも小さかった。一方、初心者群では、頭部と足首が腰と膝よりも玉との最大相互相関が高い傾向にあった。

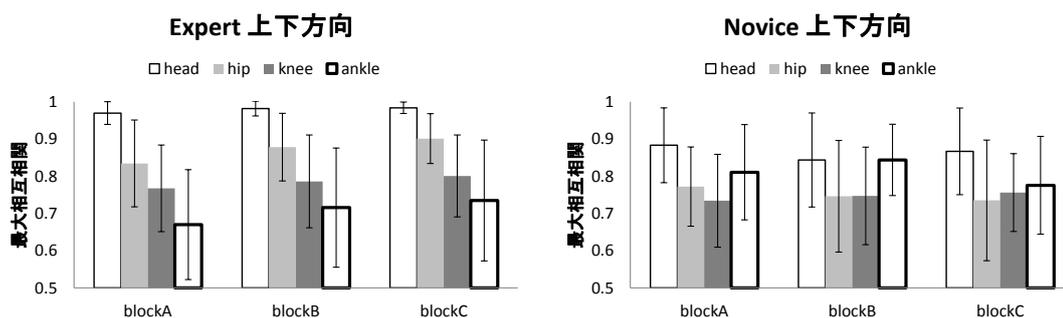


図 12 上下方向の最大相互相関. 左側が熟練者群を, 右側が初心者群を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

CCF の結果を全体としてまとめると, 熟練者群では頭部と腰が玉との相関が膝や足首よりも群内で相対的に大きい傾向があり, 前後方向では腰と玉, 上下方向では頭部と玉との CCF が検討した身体部位のなかで最も大きかったが, 初心者群では前後方向は腰と玉の CCF が, 上下方向では頭部と玉, 足首と玉との CCF が相対的に大きい傾向があった.

相互相関のラグ. 上記の相互相関の分析では相互相関の絶対値の最大値について検討した. 続いて, 最大相互相関をとるときのラグを検討した. ラグについては, Group と Body の効果について特に検討するため, 各群で身体部位ごとに前後方向と上下方向のそれぞれで最大相互相関時のラグを検出した(表 1~4, 図 13~16). ラグの符号が正のとき, 玉の時系列より身体部位の時系列が遅れていることを示す. 前後方向のラグについては, 熟練者は腰と玉とのラグの 93.09%が 0~0.2 秒までの区間で検出されたが, その他の身体部位では, 同じ区間で相対度数が低かった(頭部と玉のラグは 0%, 膝と玉では 4.54%, 足首と玉では 6.70%). 頭部と玉とのラグは 0.2~0.4, 膝と玉, 足首と玉とのラグは -0.2~0, 0.2~0.3 秒の区間で多く検出された(それぞれの区間で頭部と玉とのラグは 67.39%, 膝と玉では 93.09%, 足首と玉では 78.62%)(表 1, 図 13). 一方, 初心者群では, すべての部位でラグが -0.1~0.5 秒の区間で多く検出された(頭部と玉とのラグは 92.76%,

腰と玉では98.60%, 膝と玉では98.83%, 足首と玉では95.31%)。相互相関の値が相対的に大きかった腰と玉とのラグについてより詳細に見ると、腰と玉とのラグは-0.1~0.1秒と0.3~0.4秒の区間に多く検出されていた(78.74%)。相互相関の分析では、前後方向の腰と玉との相関が両群で大きかった(表2, 図14)。熟練者群の腰と玉のラグについては、腰の時系列の時間遅れは0~0.2秒の区間に集中しているが、前後方向の初心者の腰の時系列の時間遅れは-0.1~0.1秒と0.3~0.4秒の区間で多く、熟練者よりもラグ検出される区間にばらつきがあった。

上下方向のラグについては、熟練者群では、玉に対する身体部位の時間遅れが-0.1~0秒の区間で多く検出された。特に玉に対する頭部のラグは99.14%が同区間で検出された。腰と玉とのラグは-0.1~0秒の区間(76.46%)に加えて、0~0.1秒の区間でも次いで多く検出された(19.44%)。膝と玉、足首と玉とのラグは、-0.1~0秒の区間(39.96%, 30.45%)と0~0.1秒の区間(12.10%, 21.60%)と-0.5~-0.4秒の区間(38.88%, 22.25%)で多く検出された(表3, 図15)。初心者群でも玉に対する頭部の時間遅れが-0.1~0秒の区間で多く検出され、52.10%のラグが同区間で検出されたが、-0.2~0.4の区間でほとんどのラグが検出された(99.07%)。足首と玉とのラグも-0.1~0秒の区間で多く検出された(43.66%)が、-0.2~0.3の区間でほとんどのラグが検出された(97.89%)。腰については、玉に対する時間遅れが-0.1~0.3秒の区間で91.59%のラグが検出され、膝については、0.1~0.3秒の区間でラグが検出されることが多かった(71.50%)(表4, 図16)。相互相関の値についての分析では、熟練者群では頭部と玉が、初心者群では頭部と玉、足首と玉との相互相関が他部位よりも大きかった。それら部位でのラグは、両群ともに玉に対する身体の時系列の時間遅れが-0.1~0秒の間に多く検出された。特に熟練者群では、頭部と玉とのラグの約100%が同区間で検出されており、玉に対する頭部運動が予期的なものであったと考えられる。

表 1 熟練者群における前後方向の相互相関のラグの度数(左)と相対度数(右).

データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle	データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle
-1~-0.9	0	0	0	0	-1~-0.9	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.9~-0.8	0	0	0	0	-0.9~-0.8	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.8~-0.7	0	0	0	0	-0.8~-0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.7~-0.6	0	0	0	0	-0.7~-0.6	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.6~-0.5	0	0	0	0	-0.6~-0.5	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.5~-0.4	0	0	0	0	-0.5~-0.4	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.4~-0.3	0	0	0	0	-0.4~-0.3	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.3~-0.2	13	0	0	1	-0.3~-0.2	0.028	0.000	0.000	0.002
-0.2~-0.1	31	0	167	202	-0.2~-0.1	0.067	0.000	0.361	0.436
-0.1~0	50	4	85	82	-0.1~0	0.108	0.009	0.184	0.177
0~0.1	0	137	0	0	0~0.1	0.000	0.296	0.000	0.000
0.1~0.2	0	294	21	31	0.1~0.2	0.000	0.635	0.045	0.067
0.2~0.3	138	27	179	80	0.2~0.3	0.298	0.058	0.387	0.173
0.3~0.4	174	0	10	15	0.3~0.4	0.376	0.000	0.022	0.032
0.4~0.5	44	0	0	31	0.4~0.5	0.095	0.000	0.000	0.067
0.5~0.6	0	0	0	17	0.5~0.6	0.000	0.000	0.000	0.037
0.6~0.7	8	1	1	1	0.6~0.7	0.017	0.002	0.002	0.002
0.7~0.8	1	0	0	2	0.7~0.8	0.002	0.000	0.000	0.004
0.8~0.9	0	0	0	1	0.8~0.9	0.000	0.000	0.000	0.002
0.9~1	0	0	0	0	0.9~1	0.000	0.000	0.000	0.000
1~1.1	3	0	0	0	1~1.1	0.006	0.000	0.000	0.000
1.1~1.2	1	0	0	0	1.1~1.2	0.002	0.000	0.000	0.000
合計	463	463	463	463	合計	1.000	1.000	1.000	1.000

熟練者群 前後方向 ラグ

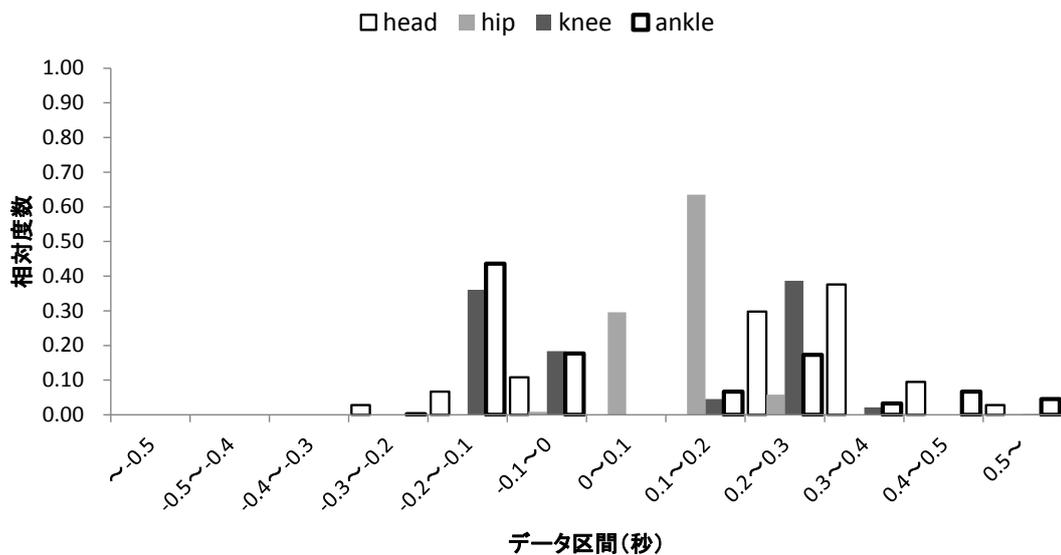


図 13 熟練者群の前後方向における玉と各身体部位の最大相互相関のラグの相対度数. なお, データ区間が正の符号をとるとき, 玉の運動が先行していることを示している.

表 2 初心者群における前後方向の相互相関のラグの度数(左)と相対度数(右).

データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle	データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle
-1~-0.9	0	0	0	0	-1~-0.9	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.9~-0.8	0	0	0	0	-0.9~-0.8	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.8~-0.7	0	0	0	0	-0.8~-0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.7~-0.6	0	0	0	0	-0.7~-0.6	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.6~-0.5	0	0	0	0	-0.6~-0.5	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.5~-0.4	0	1	0	0	-0.5~-0.4	0.000	0.002	0.000	0.000
-0.4~-0.3	1	0	2	2	-0.4~-0.3	0.002	0.000	0.005	0.005
-0.3~-0.2	2	0	1	1	-0.3~-0.2	0.005	0.000	0.002	0.002
-0.2~-0.1	5	1	2	3	-0.2~-0.1	0.012	0.002	0.005	0.007
-0.1~0	48	103	61	82	-0.1~0	0.112	0.241	0.143	0.192
0~0.1	45	91	113	80	0~0.1	0.105	0.213	0.264	0.188
0.1~0.2	111	13	60	73	0.1~0.2	0.259	0.030	0.140	0.171
0.2~0.3	96	27	64	81	0.2~0.3	0.224	0.063	0.150	0.190
0.3~0.4	83	143	76	33	0.3~0.4	0.194	0.334	0.178	0.077
0.4~0.5	14	45	49	57	0.4~0.5	0.033	0.105	0.114	0.134
0.5~0.6	4	4	0	10	0.5~0.6	0.009	0.009	0.000	0.023
0.6~0.7	3	0	0	3	0.6~0.7	0.007	0.000	0.000	0.007
0.7~0.8	3	0	0	0	0.7~0.8	0.007	0.000	0.000	0.000
0.8~0.9	5	0	0	1	0.8~0.9	0.012	0.000	0.000	0.002
0.9~1	8	0	0	0	0.9~1	0.019	0.000	0.000	0.000
1~1.1	0	0	0	0	1~1.1	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1~1.2	0	0	0	0	1.1~1.2	0.000	0.000	0.000	0.000
合計	428	428	428	426	合計	1.000	1.000	1.000	1.000

初心者群 前後方向 ラグ

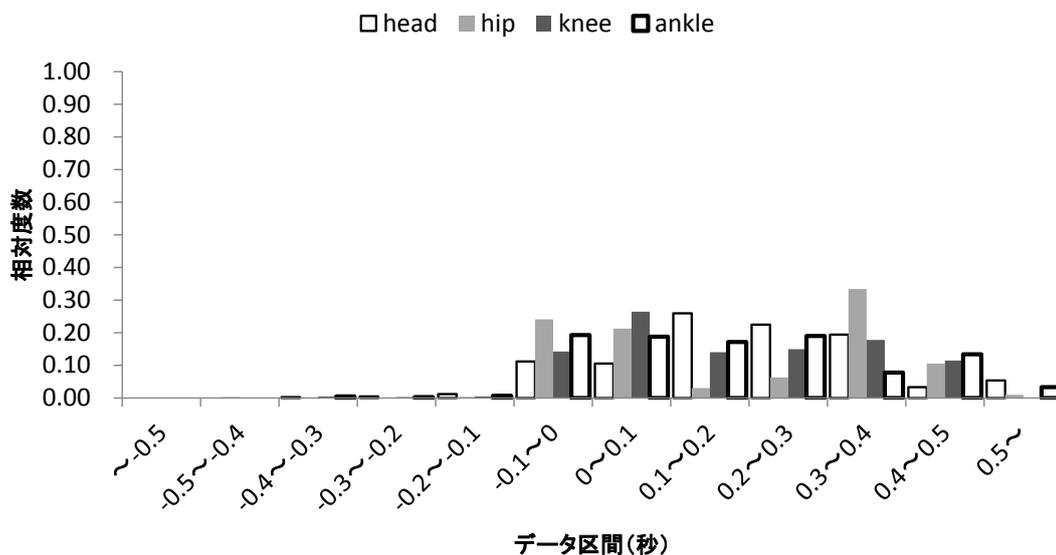


図 14 初心者群の前後方向における玉と各身体部位の最大相互相関のラグの相対度数.なお, データ区間が正の符号をとるとき, 玉の運動が先行していることを示している.

表 3 熟練者群における上下方向の相互相関のラグの度数(左)と相対度数(右).

データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle	データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle
-1~-0.9	0	0	0	1	-1~-0.9	0.000	0.000	0.000	0.002
-0.9~-0.8	0	0	0	0	-0.9~-0.8	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.8~-0.7	0	0	0	1	-0.8~-0.7	0.000	0.000	0.000	0.002
-0.7~-0.6	0	0	0	0	-0.7~-0.6	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.6~-0.5	0	5	1	2	-0.6~-0.5	0.000	0.011	0.002	0.004
-0.5~-0.4	0	13	180	103	-0.5~-0.4	0.000	0.028	0.389	0.222
-0.4~-0.3	0	0	39	30	-0.4~-0.3	0.000	0.000	0.084	0.065
-0.3~-0.2	0	0	0	4	-0.3~-0.2	0.000	0.000	0.000	0.009
-0.2~-0.1	0	0	0	19	-0.2~-0.1	0.000	0.000	0.000	0.041
-0.1~0	459	354	185	141	-0.1~0	0.991	0.765	0.400	0.305
0~0.1	4	90	56	100	0~0.1	0.009	0.194	0.121	0.216
0.1~0.2	0	0	1	12	0.1~0.2	0.000	0.000	0.002	0.026
0.2~0.3	0	0	0	9	0.2~0.3	0.000	0.000	0.000	0.019
0.3~0.4	0	1	0	32	0.3~0.4	0.000	0.002	0.000	0.069
0.4~0.5	0	0	0	7	0.4~0.5	0.000	0.000	0.000	0.015
0.5~0.6	0	0	0	0	0.5~0.6	0.000	0.000	0.000	0.000
0.6~0.7	0	0	0	0	0.6~0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
0.7~0.8	0	0	1	1	0.7~0.8	0.000	0.000	0.002	0.002
0.8~0.9	0	0	0	1	0.8~0.9	0.000	0.000	0.000	0.002
0.9~1	0	0	0	0	0.9~1	0.000	0.000	0.000	0.000
1~1.1	0	0	0	0	1~1.1	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1~1.2	0	0	0	0	1.1~1.2	0.000	0.000	0.000	0.000
合計	463	463	463	463	合計	1.000	1.000	1.000	1.000

熟練者群 上下方向 ラグ

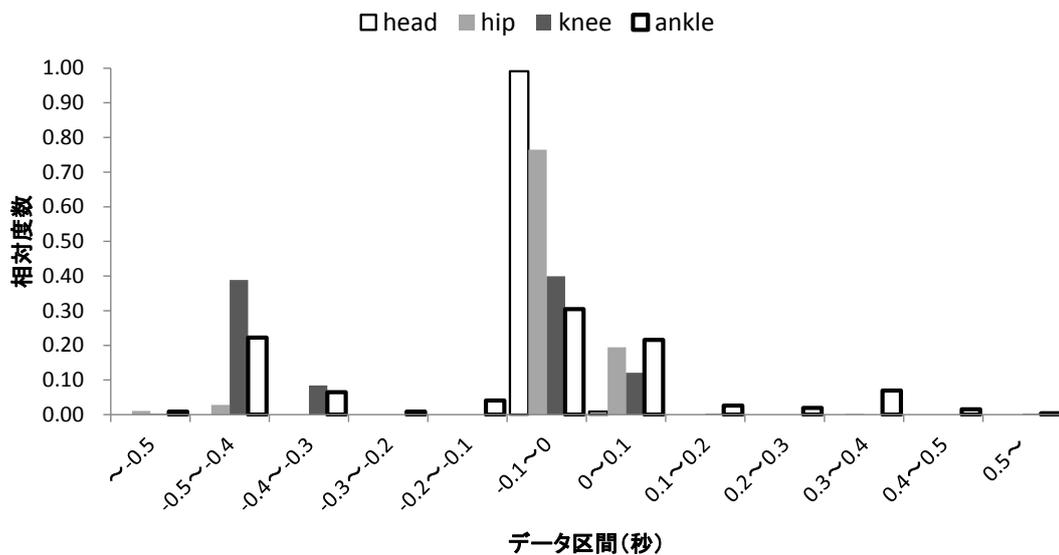


図 15 熟練者群の上下方向における玉と各身体部位の最大相互相関のラグの相対度数. なお, データ区間が正の符号をとるとき, 玉の運動が先行していることを示している.

表 4 初心者群における上下方向の相互相関のラグの度数(左)と相対度数(右).

データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle	データ区間(秒)	head	hip	knee	ankle
-1~-0.9	0	0	0	0	-1~-0.9	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.9~-0.8	0	0	0	0	-0.9~-0.8	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.8~-0.7	0	0	0	0	-0.8~-0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.7~-0.6	0	0	0	0	-0.7~-0.6	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.6~-0.5	0	0	0	0	-0.6~-0.5	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.5~-0.4	0	0	0	0	-0.5~-0.4	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.4~-0.3	0	0	0	0	-0.4~-0.3	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.3~-0.2	0	8	3	4	-0.3~-0.2	0.000	0.019	0.007	0.009
-0.2~-0.1	21	16	35	43	-0.2~-0.1	0.049	0.037	0.082	0.101
-0.1~0	223	89	45	186	-0.1~0	0.521	0.208	0.105	0.437
0~0.1	38	77	31	80	0~0.1	0.089	0.180	0.072	0.188
0.1~0.2	14	119	181	62	0.1~0.2	0.033	0.278	0.423	0.146
0.2~0.3	65	107	125	46	0.2~0.3	0.152	0.250	0.292	0.108
0.3~0.4	63	11	7	5	0.3~0.4	0.147	0.026	0.016	0.012
0.4~0.5	4	0	0	0	0.4~0.5	0.009	0.000	0.000	0.000
0.5~0.6	0	0	1	0	0.5~0.6	0.000	0.000	0.002	0.000
0.6~0.7	0	0	0	0	0.6~0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
0.7~0.8	0	0	0	0	0.7~0.8	0.000	0.000	0.000	0.000
0.8~0.9	0	0	0	0	0.8~0.9	0.000	0.000	0.000	0.000
0.9~1	0	1	0	0	0.9~1	0.000	0.002	0.000	0.000
1~1.1	0	0	0	0	1~1.1	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1~1.2	0	0	0	0	1.1~1.2	0.000	0.000	0.000	0.000
合計	428	428	428	428	合計	1.000	1.000	1.000	1.000

初心者群 上下方向 ラグ

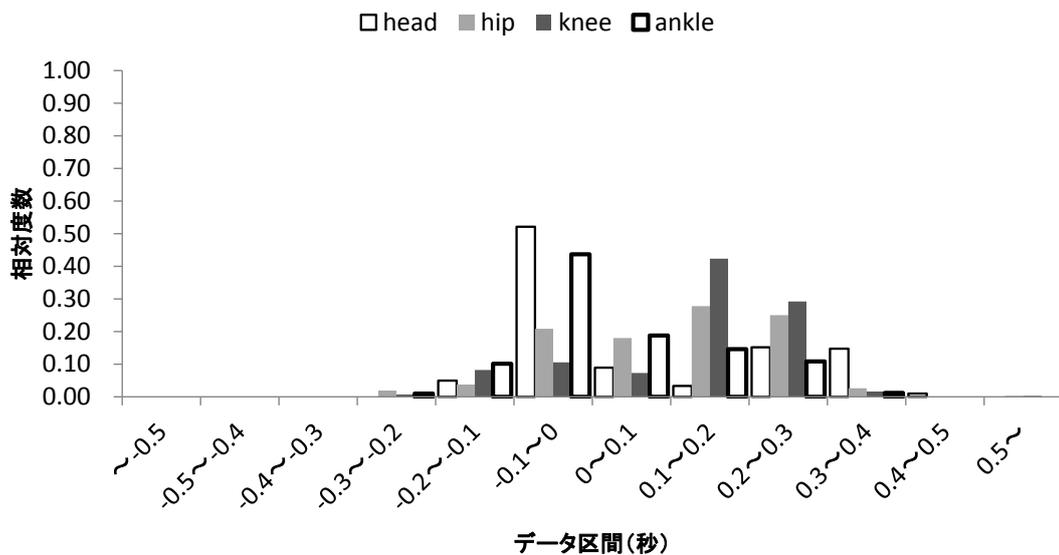


図 16 初心者群の上下方向における玉と各身体部位の最大相互相関のラグの相対度数. なお, データ区間が正の符号をとるとき, 玉の運動が先行していることを示している.

CRQA.

運動する玉と姿勢制御の関係を評価するために、前後・上下方向の玉の運動と姿勢(頭部・腰・膝・足首)のそれぞれについて、%REC と MAXLINE を算出した(図 17~20). 算出された上下方向と前後方向の%REC と MAXLINE の値に対して、混合モデルを用いた Group (熟練者/初心者)×Blocks (A/B/C)×Body (玉・頭部/玉・腰/玉・膝/玉・足首)の分散分析を行った.

前後方向の%REC. 3 要因の分散分析の結果、Body の主効果、Group×Blocks と Group×Body と Blocks×Body の交互作用、Group×Block×Body の交互作用が有意であった[それぞれ順に、 $F(3, 18) = 155.31, p < .001$; $F(2, 12) = 7.44, p < .01$; $F(3, 18) = 92.56, p < .001$; $F(6, 36) = 3.06, p < .05$; $F(6, 36) = 4.14, p < .01$]. そこで、各 Block について Group×Body の分散分析を行った. その結果、Block A では Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった[$F(3, 18) = 61.34, p < .001$; $F(3, 18) = 13.36, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果、Block A においては、各身体部位に対して Group による有意差が認められなかった. 熟練者群では Body によって%REC の値が異なっており[$F(3, 18) = 66.65, p < .001$], 玉と腰の%REC は玉と他の 3 部位の%REC よりも大きかった($p < .001$). 初心者群でも Body によって%REC の値が異なっており[$F(3, 18) = 3.18, p < .001$], 玉と腰の%REC は玉と足首のそれよりも大きかった($p < .01$). Block B についても Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であり[$F(3, 18) = 48.80, p < .001$; $F(3, 18) = 49.67, p < .001$], Group の主効果は有意傾向があった[$F(1, 6) = 5.21, p < .10$]. 単純主効果の検定の結果、各身体部位における Group の効果については、玉と頭部、玉と膝、玉と足首との%REC は初心者群のほうが熟練者群よりも大きく、玉と腰との%REC は熟練者群のほうが大きかった($p < .05$). 熟練者群では Body によって%REC の値が異なっており[$F(3, 18) = 114.46, p < .001$], 玉と腰との%REC は玉と他の 3 部位との%REC よりも大きく、玉と膝との%REC は玉と足首とのそれよりも大きかった(p

< .05). 初心者群でも Body によって%REC の値が異なる傾向があったが[$F(3, 18) = 3.07, p < .10$], 身体部位間で差は認められなかった. Block C については, Body の主効果と Group×Body の交互作用が有意であった[$F(3, 18) = 62.49, p < .001$; $F(3, 18) = 56.63, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果, 各身体部位における Group の効果については, 玉と腰との%REC は熟練者群の方が大きく, 玉と足首との%REC は初心者群の方が大きく($p < .01$), 玉と頭部との%REC は初心者群のほうが熟練者群よりも大きい傾向があった($p < .10$). Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって%REC の値が異なっており[$F(3, 18) = 120.65, p < .001$], 玉と腰との%REC は玉と他の3部位との%REC よりも大きく, 玉と膝との%REC は玉と足首とのそれよりも大きく($p < .001$), 玉と膝との%REC は玉と頭部とのそれよりも大きい傾向があった($p < .10$). 初心者群でも Body によって%REC の値が異なっており[$F(3, 18) = 7.20, p < .01$], 玉と膝, 玉と頭部との%REC は玉と足首とのそれよりも大きかった($p < .05$).

前後方向の%REC についてまとめる. 各身体部位への Group の効果に着目すると, Block A ではどの身体部位に対しても Group の効果が見られなかったが, Block B, C では腰は熟練者群のほうが, 足首や頭部は初心者群のほうが玉との%REC が大きい傾向にあった.各群での%REC に対する身体部位の効果に着目すると, 熟練者群では腰と玉との%REC が最も大きく, 次いで膝と玉との%REC が大きかった. 初心者群では, Block ごとに%REC が大きくなる身体部位が異なっており, 熟練者ほどの一貫した傾向はみられなかった.

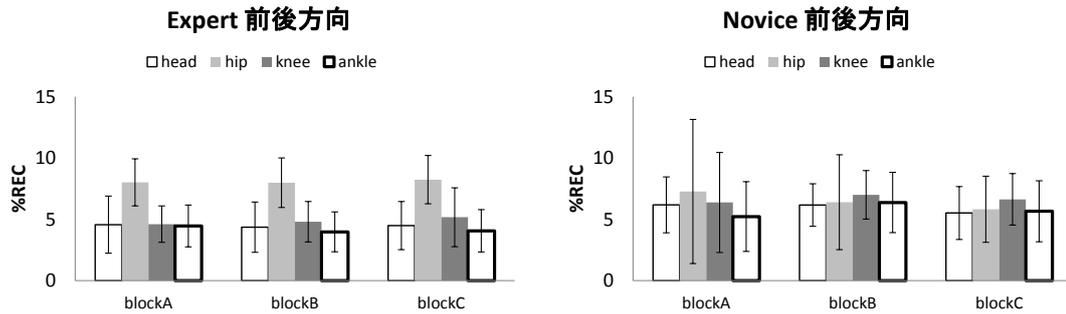


図 17 前後方向の%REC. 左側が熟練者群を, 右側が初心者群を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

上下方向の%REC. 3 要因の分散分析の結果, Block, Body の主効果 [$F(2, 12) = 24.09, p < .001$; $F(3, 18) = 202.39, p < .001$], Group \times Block, Group \times Body, Block \times Body の交互作用 [$F(2, 12) = 13.75, p < .001$; $F(3, 18) = 54.33, p < .001$; $F(6, 36) = 10.55, p < .001$], Group \times Block \times Body の交互作用 [$F(6, 36) = 14.35, p < .001$] が有意であった. そこで, 各 Block において Group \times Body の分散分析を行った. その結果, Block A では, Body の主効果が有意であった [$F(3, 18) = 114.97, p < .001$]. 多重比較の結果, 頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との%REC が大きかった ($p < .001$). Block B では, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 47.59, p < .001$; $F(3, 18) = 35.71, p < .001$]. 単純主効果の検定により, 各身体部位に対する Group の効果を検討したところ, 腰と玉, 膝と玉との%REC は初心者群のほうが熟練者群よりも大きく ($p < .05$), 足首と玉との%REC は初心者群のほうが熟練者群よりも大きい傾向があった ($p < .10$). Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって%REC の値が異なっており [$F(3, 18) = 65.10, p < .001$], 頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との%REC の値が大きかった ($p < .05$). 初心者群でも Body によって%REC の値が異なっていたが [$F(3, 18) = 24.59, p < .001$], 熟練者群とは異なり, 腰と玉との%REC が頭部と玉, 足首と玉との%REC より値が大きかった ($p < .01$). Block C でも, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 68.04, p < .001$; $F(3, 18) = 46.92, p < .001$]. 単純主効果の検定の

結果、膝と玉との%RECは初心者群のほうが熟練者群よりも大きかった($p < .05$). GroupによるBodyの効果については、熟練者群ではBodyによって%RECの値が異なっており [$F(3, 18) = 59.058, p < .001$], 頭部はその他の3部位よりも、腰は、膝と足首よりも玉との%RECの値が大きかった($p < .001$). 初心者群でもBodyによって%RECの値が異なっていたが [$F(3, 18) = 55.68, p < .001$], 熟練者群とは異なり、足首は他の3部位より玉との%RECが小さく、膝は頭部よりも玉との%RECが大きかった($p < .05$).

上下方向の%RECの結果を要約すると、各身体部位へのGroupの効果に着目すると、各身体部位に対するGroupの効果は見られないか、初心者のほうが%RECの値は大きかった。頭部と玉との%RECは、両群で有意差が認められなかった。各群での%RECに対する身体部位の効果に着目すると、熟練者群では、頭部と玉との%RECが最も大きく、次いで腰と玉との%RECの値が大きかった。Block Cのみ膝と玉、足首と玉との%RECに差がみられなかったが、Block AとBlock Bでは膝と玉との%RECのほうが足首と玉とのそれよりも値が大きかった。一方、初心者群では、Block Bを除き、他部位よりも足首と玉との%RECが小さくなっていたが、Blockごとで傾向が変化しており、熟練者群ほど一貫した傾向はみられなかった。

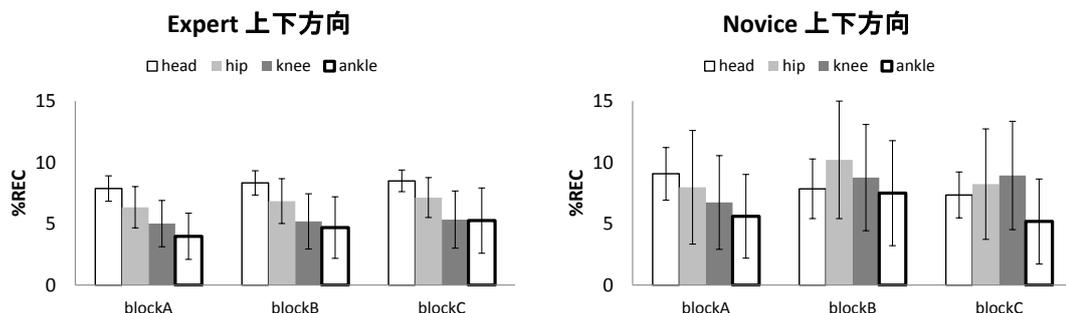


図 18 上下方向の%REC. 左側が熟練者群を、右側が初心者群を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

前後方向の MAXLINE. 3 要因の分散分析の結果, Block, Body の主効果 [$F(2, 12) = 14.75$, $p < .001$; $F(3, 18) = 89.27$, $p < .001$], Group \times Block, Group \times Body, Block \times Body の交互作用 [$F(2, 12) = 11.42$, $p < .01$; $F(3, 18) = 4.38$, $p < .05$; $F(6, 36) = 6.17$, $p < .001$], Group \times Block \times Body の交互作用 [$F(6, 36) = 7.27$, $p < .001$] が有意であった。そこで, 各 Block について Group \times Body の分散分析を行った。その結果, Block A では Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 11.39$, $p < .001$; $F(3, 18) = 9.13$, $p < .001$]。単純主効果の検定の結果, 身体の各部位について, Group による有意差は認められなかった。熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 14.85$, $p < .001$], 腰と足首は頭部よりも玉との MAXLINE の値が大きく ($p < .05$)。腰は膝よりも, 膝は頭部よりも玉との MAXLINE の値が大きい傾向があった ($p < .10$)。初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 6.44$, $p < .01$], 腰は足首よりも玉との MAXLINE の値が大きく ($p < .05$), 膝は足首よりも玉との MAXLINE が大きい傾向があった ($p < .10$)。Block B については Body の主効果のみ有意であった [$F(3, 18) = 32.91$, $p < .001$]。多重比較の結果, 腰と玉, 膝と玉との MAXLINE は足首と玉, 頭部と玉との MAXLINE よりも値が大きく, 足首と玉との MAXLINE は頭部と玉との MAXLINE よりも値が大きかった ($p < .01$)。Block C については, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(3, 18) = 63.98$, $p < .001$; $F(3, 18) = 8.39$, $p < .01$]。単純主効果の検定の結果, 各身体部位に対する Group の効果は, Block A と同様に有意差が認められなかった。Group に対する Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 35.06$, $p < .001$], 膝と腰は足首と頭部よりも玉との MAXLINE が大きく ($p < .001$), 膝は腰よりも玉との MAXLINE が大きい傾向があった ($p < .10$)。初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 37.14$, $p < .001$], 膝と腰は足首と頭部よりも玉との MAXLINE が大きく ($p < .01$), 腰は膝よりも玉との MAXLINE が大きい傾向があった (p

< .10).

前後方向の MAXLINE についてまとめる. 各身体部位への Group の効果は認められなかった. 各群での MAXLINE に対する身体部位の効果に着目すると, 熟練者群でも初心者群でも, 腰と玉, 膝と玉との MAXLINE が頭部と玉, 足首と玉との MAXLINE よりも大きい傾向にあった.

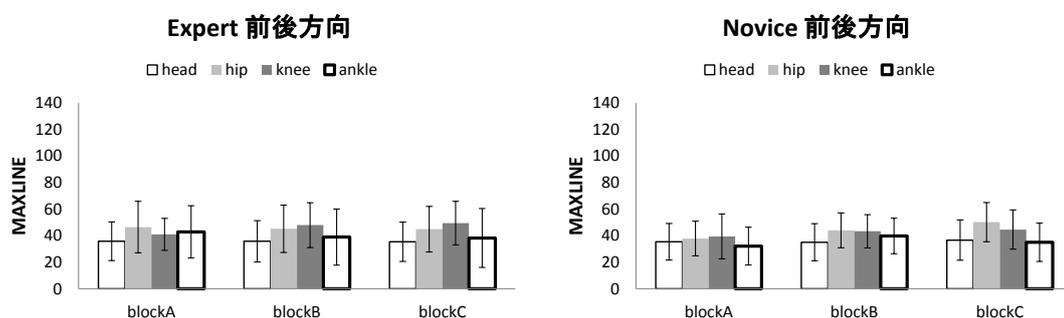


図 19 前後方向の MAXLINE. 左側が熟練者群を, 右側が初心者群を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

上下方向の MAXLINE. 3 要因の分散分析の結果, Group, Block, Body の主効果 [$F(1, 6) = 87.50, p < .001$; $F(2, 12) = 51.76, p < .001$; $F(3, 18) = 1550.08, p < .001$], Group \times Body, Block \times Body の交互作用 [$F(3, 18) = 659.83, p < .001$; $F(6, 36) = 3.48, p < .01$], Group \times Block \times Body の交互作用 [$F(6, 36) = 4.08, p < .01$] が有意であった. そこで, 各 Block において Group \times Body の分散分析を行った. その結果, Block A では, Group, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった [$F(1, 6) = 69.07, p < .001$; $F(3, 18) = 566.04, p < .001$; $F(3, 18) = 219.94, p < .001$]. 単純主効果の検定の結果, 頭部, 腰, 膝と玉との MAXLINE は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく ($p < .001$), 足首と玉との MAXLINE は両群で有意差はなかった. Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており [$F(3, 18) = 799.62, p < .001$], 頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との相互相関が大きかった ($p < .001$). 初心者群でも Body によっ

て相互相関の値が異なっていたが $[F(3, 18) = 54.12, p < .001]$, 熟練者群とは異なり, 頭部はその他の部位よりも, 膝は足首よりも玉との MAXLINE の値が大きかった($p < .05$). Block B でも, Group, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった $[F(1, 6) = 63.63, p < .001; F(3, 18) = 443.93, p < .001; F(3, 18) = 256.30, p < .001]$. 単純主効果の検定の結果, Block A と同様に, 頭部, 腰, 膝と玉との MAXLINE は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく($p < .001$), 足首と玉との MAXLINE は両群で有意差はなかった. Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており $[F(3, 18) = 809.94, p < .001]$, Block A と同様に, 頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との相互相関が大きかった($p < .001$). 初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっていたが $[F(3, 18) = 24.65, p < .001]$, 熟練者群とは異なり, 頭部がその他の部位よりも玉との MAXLINE の値が大きかった($p < .001$). Block C でも, Group, Body の主効果と Group \times Body の交互作用が有意であった $[F(1, 6) = 103.58, p < .001; F(3, 18) = 574.24, p < .001; F(3, 18) = 193.65, p < .001]$. 単純主効果の検定の結果, Block A, Block B と同様頭部, 腰, 膝と玉との MAXLINE は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく($p < .001$), 足首と玉との MAXLINE は両群で有意差はなかった. Group による Body の効果については, 熟練者群では Body によって相互相関の値が異なっており $[F(3, 18) = 751.08, p < .001]$, Block A, Block B と同様に頭部, 腰, 膝, 足首の順で玉との相互相関が大きかった($p < .001$).初心者群でも Body によって相互相関の値が異なっていたが $[F(3, 18) = 69.25, p < .001]$, 熟練者群とは異なり, 頭部は他の 3 部位よりも, 膝は足首よりも玉との MAXLINE が大きく($p < .01$), 膝は腰よりも玉との MAXLINE の値が大きい傾向があった($p < .10$).

上下方向の MAXLINE の結果を要約すると, 各身体部位への Group の効果に着目すると, すべての Block で, 頭部と玉, 腰と玉, 膝と玉との MAXLINE は熟練者群のほうが初心者群よりも大きく, 足首と玉との MAXLINE には両群で差が認められなかった. 各

群での MAXLINE に対する身体部位の効果に着目すると、熟練者群では、すべての Block で、頭部と玉との MAXLINE が最も大きく、次いで腰と玉、その次が膝と玉の MAXLINE が大きかった。足首と玉との MAXLINE の値が最も小さかった。初心者群では、Block を通して頭部と玉との MAXLINE が他部位と玉とのそれよりも大きかった。

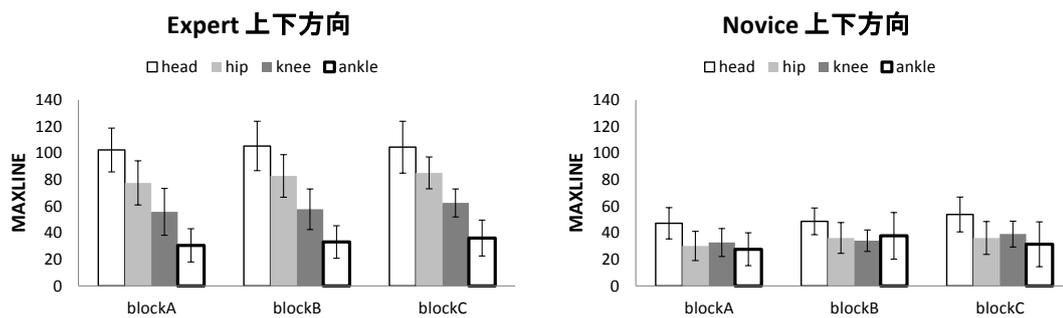


図 20 上下方向の MAXLINE. 左側が熟練者群を、右側が初心者群を示す。エラーバーは標準偏差を示す。

CRQA の結果をまとめると、相互相関の分析と同様に、前後方向よりも上下方向の玉と姿勢との%REC と MAXLINE に両群での差が顕著であった。上下方向では、熟練者群では%REC も MAXLINE も、頭部、腰、膝、足首の順に値が大きい傾向があった。これは CCF の結果と同様であった。一方、各身体部位に対する Group の効果は、%REC と MAXLINE で異なっていた。CCF では、熟練者群の頭部と玉、腰と玉との相互相関は初心者群よりも大きく、膝と玉との CCF には差は認められず、足首と玉との CCF は初心者群のほうが大きかった。その結果と類似して、MAXLINE は初心者群よりも、頭部、腰、膝については熟練者群のほうが値が大きく、足首では差が認められなかった。それに対し、%REC では、各身体部位に対して両群で差が認められないか、初心者のほうが値が大きく、頭部については両群で差がみられなかった。したがって、上下方向での玉と頭部の運動の関係について、共有された活動の割合自体は両群で差が認められない一方、それら運動が共有された場合には、初心者群よりも、同一のパターンが長く持続してい

たと言える。初心者群の上下方向の玉と身体運動については、CCF では、頭部と足首が腰と膝よりも玉との最大相互相関が高くなる傾向があったものの、MAXLINE の結果では、頭部と玉との値が他部位と玉との値よりも大きかった。

Variable Error: 各ふりけん試行の最終時点における、玉と身体(頭部/腰/膝/足首)との距離($VE_{distance}$)と方向($VE_{direction}$)の一貫性。

熟練者群では、ふりけんの成否を決める各試行の最終フェーズで、玉が頭部の前に近づいたときに試行を終了させているように見えた。そのため、各試行の最後での、玉と身体(頭部/腰/膝/足首)との距離と方向の一貫性について検討した。それら一貫性を評価するために、各実験参加者でブロックごとに、玉と身体との距離と方向について Variable Error を算出した。玉の軌跡の分析でも述べたように、熟練者群の玉の運動は、初心者群に比べて再現性が高かった。玉の運動は Variable error に影響を与えるため、できるだけ姿勢制御の影響を検討できるように、玉-身体の VE を任意の座標系における玉の VE(原点と試行の最後の点との距離、方向のばらつき)で除算した。 $VE_{distance}$ と $VE_{direction}$ の値について、混合モデルを用いた Group (熟練者/初心者)×Blocks (A, B, C) ×Body (頭部-玉/腰-玉/膝-玉/足首-玉)の分散分析を行った。

$VE_{distance}$ 図 21 の上側は、熟練者群と初心者群の玉-頭部、腰-玉、膝-玉、足首-玉の $VE_{distance}$ の値を示している。分散分析の結果、group の主効果が有意であった [$F(1, 6) = 91.28, p < .001$]. Group×Body の交互作用も有意であった [$F(3, 18) = 30.02, p < .001$]. その他の主効果と交互作用は有意ではなかった。各群での body の単純主効果の検定は、熟練者群と初心者群の両群で、身体部位によって $VE_{distance}$ の値が異なることを示した [それぞれ $F(3, 18) = 23.55, p < .001$; $F(3, 18) = 8.71, p < .001$]. 熟練者群では、玉-頭部と玉-腰の $VE_{distance}$ は玉-腰と玉-足首のそれよりも小さく、玉-頭の $VE_{distance}$ は玉-腰のそれよりも小さかった ($p < .001$). また、玉-膝の $VE_{distance}$ は玉-足首のそれよりも小さい傾

向があった($p < .10$). 初心者群では, 玉-頭部の $VE_{distance}$ が玉-腰と玉-足首のそれよりも大きい傾向があった($p < .10$). 各身体部位による group の単純主効果の検定の結果, 頭部と腰において, 熟練者群のほうが初心者群よりも $VE_{distance}$ の値が小さいことが示された [$F(1, 18) = 129.19, p < .001$; $F(1, 18) = 51.94, p < .001$]. 膝と足首においては, 両群で差がなかった.

$VE_{direction}$ 図 21 の下側は, 熟練者群と初心者群の玉-頭部, 腰-玉, 膝-玉, 足首-玉の $VE_{distance}$ の平均値を示している. 分散分析の結果, body の主効果が有意であり [$F(3, 18) = 25.06, p < .001$], group の主効果が有意傾向にあった [$F(1, 6) = 4.02, p < .10$]. その他の主効果と交互作用は有意ではなかった. ボンフェローニ法による多重比較の結果, $VE_{direction}$ について, 玉-足首は, 玉-頭部と玉-腰と玉-膝よりも小さく ($p < .001$), 玉-膝の $VE_{direction}$ は, 玉-頭部と玉-腰のそれよりも小さかった ($p < .05$).

VE の結果を要約すると, 熟練者群では初心者群よりも玉-頭部と玉-腰の $VE_{distance}$ について小さかった. 熟練者群においては, 玉-頭部の $VE_{distance}$ は玉-腰, 玉-膝, 玉-足首のそれよりも小さく, 玉-腰の $VE_{distance}$ は玉-膝と玉-足首のそれよりも小さかった. $VE_{direction}$ については, 熟練者群は初心者群よりも小さい傾向があった.

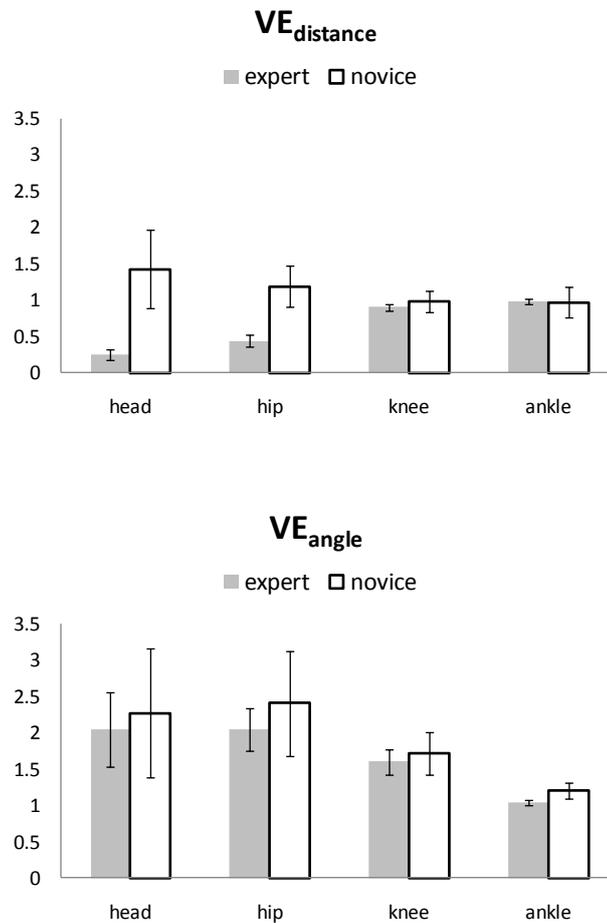


図 21 Variable Error 上側が VE_{distance}, 下側が VE_{direction} を示す. エラーバーは標準偏差を示す.

タウカップリング

タウカップリングしていた区間の有無.

ふりけんで利用されると考えられる視覚情報について、タウカップリングによって検討した。タウカップリングしていた区間があった試行数の割合は、熟練者群では 79.79%(解析可能試行 470 試行, タウカップリングしていた試行 375 試行), 初心者群では 2.67%(解析可能試行 450 試行, タウカップリングしていた試行 12 試行)であった。群によってタウカップリングしていた試行数の割合が異なるのかをカイ二乗検定で検討した。その結果, $\chi^2(1) = 561.5, p < .001$ で有意であった。したがって、熟練者群のほうが

タウカップリングしていた試行数の割合が高かったと言える。

区間ごとの k とそのばらつき。

続いて、熟練者群のみ、カップリング定数 k の値を、接触 0.20 秒前(0.225 秒前～0.175 秒前)、接触 0.15 秒前(0.175 秒前～0.125 秒前)、接触 0.10 秒前(0.125 秒前～0.075 秒前)、接触 0.05 秒前(0.075 秒前～0.025 秒前)の区間ごとで算出した(図 22)、算出した k の値に対して、混合モデルを用いて接触前の区間を要因とする分散分析を行った。その結果、 $F(3, 9)=4.88(p < .05)$ で有意であり、多重比較の結果、接触前 0.20 秒の区間の k は 0.10 秒前の区間の k よりも小さく($p < .05$)、0.05 秒前の区間の k よりも小さい傾向があった($p < .10$)。

熟練者ごとに各 set で k の値の SD を算出し、その SD のデータを用いて、各区間で SD の値が異なるのかどうかを、混合モデルを用いて接触前の区間を要因とする分散分析を行って検討した。その結果、 $F(3, 9)=9.91(p < .01)$ で有意であり、多重比較の結果、接触前 0.20 秒の区間の SD は、その他の区間の SD よりも値が大きかった($p < .05$)。熟練者群では、平均すると接触前 0.17 秒の区間でタウカップリングしており、そのことを考慮すると、より多くの試行でタウカップリングをしている区間のほうが、 k の値のばらつきが小さいと言える。

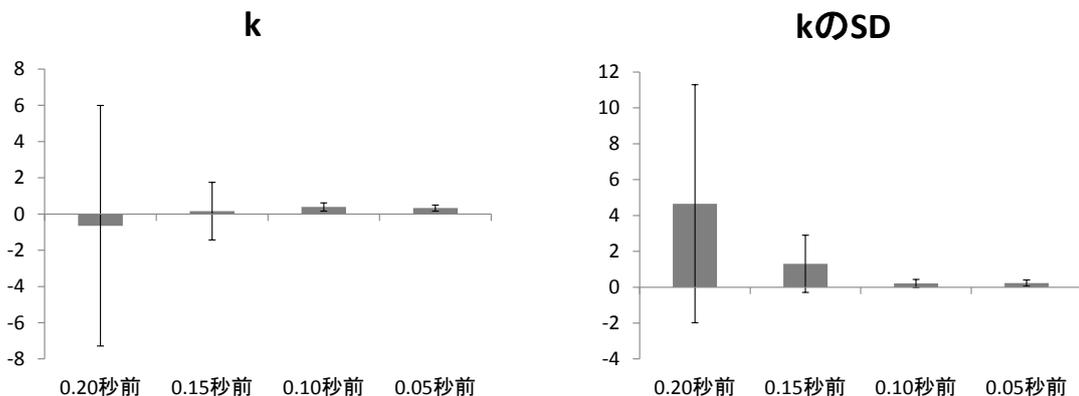


図 22 熟練者群における接触 0.20 秒前～0.05 秒前の区間における k の値(左)と各熟練者で set ごとに算出した k の値の SD 値(右)。エラーバーは標準偏差を示す。

2.3 実験 1 考察

ふりけんにおける姿勢の視覚的制御：頭部と玉との動的な知覚的カップリングの安定性

ふりけんを行うときには、熟練者群の頭部・膝の運動が初心者群のそれらよりも特に上下方向に大きかった。空間座標系において観察された玉の軌跡の最終フェーズでのばらつきは、熟練者群では、頭部と腰を原点とした身体座標系においては減少した。熟練者群の頭部と腰の運動は、玉の運動のばらつきを相殺するようなものであったと考えられた。一方、初心者群では頭部中心座標系のみ、玉の運動のばらつきを相殺する傾向が見られた。熟練者群の上下方向の頭部、腰の運動は、初心者群のそれらと比較して、玉の運動との最大相互相関が大きかったが、足首の運動については初心者群のほうが玉との最大相互相関が大きかった。熟練者群においては上下方向の頭部と玉、腰と玉、膝と玉、足首と玉という順で最大相互相関が小さくなっていった。初心者群の上下方向の玉と身体との最大相互相関については、頭部と足首が腰と膝に比べて大きい傾向があった。上下方向の相互相関のラグについては、熟練者群では、すべての身体部位について、玉に対する身体の時間遅れが-0.1~0 秒の区間に多くのラグが検出されていたが、頭部のラグ約 100%がその区間で検出された。初心者群でも、頭部と玉とのラグは-0.1~0 秒の区間に多く検出されたが、約 50%であった。CRQA の分析から、熟練者群における玉と身体部位との%REC と MAXLINE の値は、頭部において最も高く、腰、膝、足首の順で値が小さくなる傾向があった。頭部の%REC は両群で有意差が認められなかったものの、MAXLINE は熟練者群のほうが大きかった。各試行の最終時点での玉と頭部、玉と腰の距離は、熟練者群は初心者群よりも、試行間で一貫していた。熟練者群において、身体の上部が玉の運動と結びついている傾向があり、頭部運動が特に玉との関係性が強かったことを考慮に入れると、これらの結果は、ふりけんにおいて、熟練者群では、動く玉

に頭部を強くカップリングさせるようにして姿勢を制御していたものと思われる。

このような玉に対する頭部運動はどのような意味をもっていたと考えられるだろうか。ひとつには、ふりけんにおける **global flow** と **local flow** の制御への影響があるだろう。本研究では、**global flow** と **local flow** の制御を検討するために、ふりけんでは利用されると考えられる公転と自転のタウのカップリングの分析をした。熟練者群でカップリング定数 k の値を接触前の時間の区間ごとに算出した。その結果、けんと玉との接触前 0.20 秒の、他の区間よりもタウカップリングしていた試行数が少ない区間では、 k の値のばらつきが大きくなっており、接触直前の 2 つの区間より値が小さい傾向があった。Lee(1999) によって指摘されているように、タウカップリングしている場合には、 k の値は一定値に収束していたと言える。熟練者群の頭部は初心者群よりも動いていたが、タウカップリングの情報が一貫するような制御がなされており、そのために玉の運動との関係が強かったのではないかと考えられる。ただし、本研究の結果からは、頭部運動がタウカップリングに与える影響について検討しているわけではないので、情報への頭部運動の寄与はさらなる検討が必要であろう。また、玉に対する頭部運動の意義を考えた場合、ふりけんは、キャッチング動作のひとつと考えられるが、キャッチング動作においては、**Optical Acceleration Cancellation strategy**(Chapman , 1968)という方略を行為者が用いることが知られている。この方略は、放物線軌道を描いて飛んでくるボールを捕球する際に垂直方向の光学的加速を 0 付近(あるいは最小化)して保つというものであり、このようにすることで捕球者は正確な場所かつ正確なタイミングで捕球が可能になる(Oudejans, Michaels, Bakker, & Dolne, 1996)。ふりけんでは、行為者が玉を返したあと、玉は放物運動をする。物理則に従えば、玉の前後方向の運動は等速で、上下方向は加速する。玉と頭部のカップリングは、特に上下方向で顕著であったが、熟練者群では玉の上下方向の加速を最小化することで、けんを玉に入れるのに利用する視覚情報を得やすくしていたのではないかと考えられる。また、ふりけんでの熟練者群の頭部と動く玉

との動的かつ頑強なカップリングは、特に、玉を見ることが重要になる各試行の最終フェーズで、玉の回転を視覚的に追跡し、回転以外の玉の運動を相殺することで、玉の回転の検出を容易にしていたとも考えられる。頭部と玉とのカップリングによって、熟練者群にのみに視知覚可能な環境の見えが顕在化し、けんを玉に入れることができるというアフォーダンスを特定する情報の知覚が容易になっていたと考えられる。さらなる検討が必要であろうが、けん玉熟練者群の姿勢制御の特徴のひとつは、変化する環境のなかで視覚的な安定を導くように、頭部を動く玉と動的かつ強固にカップリングさせるようにする、ということにあるだろう。ふりけんにおける巧みさは、行為に関与する情報の検出を容易にするような姿勢の視覚的制御にあると言えそうだ。つまり、動的で頑強な視覚的カップリングが、動的な行為者—環境系の巧みなふるまいの成立を支える役割を果たしていたと考えられる。

膝の運動の役割：知覚的な安定性を支える柔軟性

膝の運動は、けん玉のわざの成功にとって重要であると考えられている。では、ふりけんにおいて、膝の運動の役割とはどのようなものであったのか。

ふりけんを行うとき、熟練者群は初心者群よりも大きく動いていたが、特に、上下方向の運動が大きかった。この結果は、熟練者群と初心者群の膝の運動の違いに起因するだろう。熟練者群の膝を中心とした玉の軌跡には、空間座標系における玉の軌跡で観察された最終フェーズでの変動性に変化があるとは言えなかった。頭部や腰の運動とは異なり、熟練者群の膝の運動は、最終フェーズでの玉の変動性を相殺するような働きをもっていなかったと言える。熟練者群の膝と玉との最大相互相関は、熟練者群内では、上下方向で頭部と玉、腰と玉との最大相互相関よりも小さく、足首よりは大きかった。熟練者群の膝と玉との最大相互相関を初心者群と比較した場合、前後方向でも上下方向でも両群に際は認められなかったが、特に上下方向のラグには両群で特徴が異なっていた。

熟練者群では、膝と玉とのラグが $-0.5\sim-0.4$ 秒と $-0.1\sim0.1$ の区間で多く検出されており、膝の運動が玉の運動に先行していた。初心者群では、膝と玉とのラグが $0.1\sim0.3$ 秒の区間で多く検出されており、膝の運動は玉の運動から遅れていた。上下方向の玉と膝とのMAXLINEは初心者群よりも熟練者群の方が大きく、熟練者の膝の運動と玉の運動は初心者群よりも同様のパターンが長く持続していた。各試行の最後における膝と玉との距離の一貫性は、頭部と玉とのそれと異なり、スキルによる差異がなかった。以上のことから、熟練者群の膝の運動は、頭部ほどではないにせよ、玉の運動とカップリングをしつつも、頭部が玉と強くカップリングするよう、また頭部が玉に対して予期的に制御されるように自律的に制御されていたのではないかと考えられる。このように、本研究での膝の運動は、頭部運動と玉との関係を支えることに利用されていたと考えられる。本研究では、Stoffregenらのglobal flowを制御する姿勢研究の文脈で、global flowとlocal flowが同時に生起し、時空間的な制約が厳しく、視覚情報の抽出が難しいと考えられる技での姿勢を検討した。ふりけんでは、目、頭部、膝が協調する姿勢づくりにより、global flowとlocal flowが制御されていたものと考えられ、熟練者の姿勢においては、膝の運動と頭部運動とが入れ子になって制御されているといえよう。global flowとlocal flowが同時に生起する事象(例えば球技など)での姿勢を検討することで、光学的情報と姿勢との関係はより明らかにされるだろう。

ふりけんにおける初心者の姿勢とその学習

最後に、ふりけんにおける初心者の姿勢とその学習について考察する。本研究での初心者群は、頭部や膝の運動をあまり利用していなかったが、各座標中心(環境の任意の点、頭部、腰、膝、足首)の玉の軌道の最終時点のばらつきの分析から、頭部運動は他の身体部位よりもばらつきが小さく、また、環境座標系の玉の運動よりもばらつきが小さい傾向にあり、初心者群の頭部運動には各試行の最終フェーズでの玉のばらつきを相殺する

傾向があると考えられた。玉と身体との最大相互相関の分析結果については、身体部位によって玉との最大相互相関が異なるのは両群ともに同じであったが、熟練者群では前後方向、上下方向ともに頭部や腰が玉との相関が高い傾向がある一方で、初心者群では、前後方向では腰が、上下方向では頭部と足首が玉との最大相互相関が高くなっていた。各試行の最後における玉と身体との位置関係については、初心者群は熟練者群と比較するとばらつきが大きかった。以上から、初心者群の姿勢制御は、熟練者ほどではないにせよ、他の身体部位に比べ頭部を玉とカップリングさせており、頭部によって視覚情報の探索を行っていた可能性がある。しかしながら、熟練者群のように頭部や膝が動いていたわけではないので、膝の運動によって玉と頭部とのカップリングを維持してはいないであろうし、姿勢によって制御された global flow は熟練者群とは異なるものであるだろう。本研究の熟練者群のふりけん試行はほとんどが成功試行で、初心者群の試行は失敗試行のみであった。したがって、熟練者群の成功試行と初心者群の成功試行と比較することによって、熟練者の姿勢制御特徴や初心者群における頭部運動の役割についてより明確化することができるだろう。

初心者群の姿勢の特徴は、熟練者群のそれとは異なっていたが、それは、行為者の知覚する玉の運動が初心者群と熟練者群で異なっていることに関係しているかもしれない。玉の軌跡は、熟練者群では上下方向に長い軌跡であったが、初心者群では前後方向に長い軌跡になっていた。加えて、初心者群では、玉が一回転していないことが多く、けんを玉に入れるときにそもそも玉の穴が見えていなかったことが多かったと考えられる。ふりけんの最終フェーズで玉の穴が見えない状態で玉が接近するならば、熟練者群のような姿勢をしていたとしても、「玉の穴にけんを入れることができる」というアフォーダンスを特定する視覚情報を得られないであろうから、その意味では、初心者群の姿勢は玉の運動に応じた姿勢であったと言えるかもしれない。もし初心者群の実験参加者が玉を1回転させることができたなら、視覚情報を探索する身体としての姿勢制御は異なる

ものであったのかもしれない。このようにふりけんでは、行為者が玉を 1 回転させることができたときに視知覚を容易にする姿勢制御が重要性をもつ。したがって、ふりけんを学習するときには、行為者は自分が視知覚することになる玉の軌道をいかに生成するのか、つまり、**local flow** の制御も重要になるであろう。

3章 視環境制約下でのけん玉熟練者における視覚を調整する運動の変化とその学習

第1実験では、けん玉のふりけん実行時のけん玉初心者群と熟練者群の視覚的な姿勢制御を比較し、タスクを達成する行為とはその役割が区別され、タスクに知覚的に関わる姿勢がふりけんの成功においてどのように寄与しているのかを調べた。その結果、けん玉熟練者の姿勢は、玉の落下に頭部の運動を合わせ、玉と頭部の関係を膝の運動で支えるという動的なものであった。熟練者群のそのような姿勢制御によって、回転を伴って動く玉の運動が相殺され、視覚的な安定が導かれ、けんを玉に入れることができることを特定する情報を得やすくなり、時空間的な制約が厳しいふりけんという技が成功しやすくなっていると考えられた。また、熟練者群ではそのような動的な姿勢の制御がなされるなかで、タウカップリングにおけるカップリング定数は一定値に収束していた。初心者群の姿勢制御は、熟練者群のように頭部や膝が動いてはいなかったが、熟練者ほどではないにせよ、他の身体部位に比べ頭部は玉とカップリングしており、初心者にとっても頭部運動がふりけんの制御において重要であったことが示唆された。ふりけんにおける姿勢の視覚への役割が示された一方で、初心者群の玉の運動は熟練者群に比べて前後に大きく、玉の回転が不足しており、熟練者群と初心者群では視知覚可能な情報が異なっていたと考えられた。ふりけんでの巧みなふるまいの成立には、玉の運動の操作も姿勢と同様に重要であることが確認された。

van Santvoord & Beek(1994)のジャグリング研究の結果と第1実験の結果から、時空間的な制約が厳しいなどアフォーダンスを特定する視覚情報を得にくい状況下であっても、タスクに応じた姿勢や玉の操作といった知覚的・物理的な調整が、タスクを達成するために必要な情報の検知、利用を可能にし、タスクが成立しやすくなると考えられる。同時に、情報の探索と利用によってタスクに応じた身体運動が構築されるだろう。また、実験1ではタウカップリングの分析を行ったが、頭部運動のタウカップリングへの影響

や Smith et al., (2014)らが行ったタスク条件の違いがタウカップリングに与える影響については検討できていない。そこで第2実験では、けん玉のふりけんを実験タスクとし、通常よりもさらに視覚的な制約が厳しい条件下でふりけんをしたときに、けん玉熟練者は玉と姿勢をどのように制御するのか、それら制御は練習によって変化するのか、タウカップリングへのタスク条件の効果を検討した。

こつが必要な動的なタスクでの遮蔽に対する姿勢と玉の操作の変化とその学習、さらに視覚情報への影響を調べるため、第2実験では、けん玉熟練者を対象とし、ふりけんを実行する際に、van Santvoord & Beek(1994)の実験のように、周期的・規則的にシャッターの開閉を繰り返して呈示することができる視野遮蔽メガネを用いることとした。ジャグリング研究において、周期的・規則的にシャッターの開閉が繰り返された場合、操作によってボールの運動が制御され、ボールの軌道の頂点とそれに引き続く区間がジャグラーによって選択的に見られたように、けん玉熟練者がふりけんを成功させるために見ようとする特定の軌跡区間があれば、シャッターが開いたタイミングで玉の軌道がその区間にあるように玉の運動を制御するであろう。加えて、シャッターが開いている限られた時間で視覚情報を得ることができるように目一頭部一身体系の動きを制御することも考えられる。第2実験では、視野遮蔽メガネを用いた場合に、有効な視覚情報を得ようとしてけん玉熟練者がいかに玉や頭部の運動を制御するか、またその学習を分析することによって、視覚を調整する運動と視覚情報、わざとの関係を検討した。

3.1 実験 2 方法

実験協力者

けん玉熟練者 3 名(男性 2 名, 女性 1 名, 身長は 154cm, 170cm, 174cm, 年齢は 19 歳, 28 歳, 29 歳) が実験に参加した。二人は日本けん玉協会が認定するけん玉道 5 段であり, もう一人は 6 段であった³。3 人とも視力に問題はなかった。実験開始前にインフォームドコンセントを行い, 同意を得た。実験終了後に実験協力者に対して謝金が支払われた。

装置

実験協力者の動作は, 6 台の赤外線カメラで構成される三次元動作計測装置 (VICON460, Vicon Motion Systems Ltd.) を用い, サンプリング周波数 120Hz で計測した。実験協力者に装着した赤外線カメラ用の反射マーカを用いて, 実験協力者の利き手側の頭部(国際 10-20 法の Fp1 あるいは Fp2)の運動を分析した。玉の運動を計測するため, 玉の全面に反射テープを貼付した。また, 玉の回転を記録するため, 玉の糸が接続されている部分に鋼線(長さ 6.8cm, 太さ 1.5 mm)をさしこみ, その鋼線の先に反射マーカ(心材は発泡スチロールの球体。直径 19 mm)をとり付けた。けんの向きを計測するため, けん先に反射テープを貼り, けんの中皿にマーカをつけた。

実験協力者の視環境の操作には, 視野遮蔽メガネ(PLATO, Translucent Technologies) が使用された。本装置は, あらかじめ設定したプログラムに従ってレンズ部分のシャッターを瞬時に開閉できた。眼鏡のシャッターの開閉に合わせて LED が点滅するようにし, 動作解析装置でその光を記録することでデータの同期を行った。視野遮蔽眼鏡と LED の制御には MATLAB(MathWorks 製)を用いた。

³ けん玉道における最高段位は 10 段であるが, 実力での最高段位は未成年で 5 段, 成人で 6 段である。本研究の実験協力者の 3 人は, 実力で 5 段, 6 段を認定されており, 国内でも有数の卓越したけん玉プレーヤーであった。

手続き

本研究では、実験対象者が限られるため、1 事例研究の方法(Barlow & Hersen, 1984 高木・佐久間 監訳)を採用した。視環境に対して制約がかけられた際に、けん玉熟練者はいかにして玉を操作し、姿勢を制御して、より有効な視覚情報を得ようとするのかを分析するため、次のようなスクリーニングテストを 2 回行った。スクリーニングの 1 回目と 2 回目は別の日に実施した。

実験協力者は、はじめに、メガネが開いた状態でふりけんを行った(遮蔽なし条件)。これは、通常の条件での安定した運動を記録するために行われ、1 セット(10 試行)のうち 8 回以上成功することが連続して 3 セットできれば、けん玉熟練者が普段通りのふりけんができていとみなし、そこで遮蔽なし条件を終了した⁴。

遮蔽なし条件の次に、メガネのシャッターを開閉させる「遮蔽あり条件」を行った。遮蔽あり条件では、シャッター開閉の 1 周期を 1200ms に定めた。これは実験協力者が通常ふりけん 1 試行に要する時間であった。シャッターの開閉の時間は、最初、開いている時間を 600ms、閉じている時間を 600ms とした。そして開閉を規則的に繰り返すように設定し、実験協力者がメガネの開くタイミングを予測できるようにした。メガネの開いている時間が 600ms の水準で 1 セット 10 回中 8 回成功した場合、視認可能な時間が 100ms 少なくなる水準（シャッターが開いている時間が 500ms、閉じている時間が 700ms）へと移行した⁵。5 回同じ水準を繰り返しても 1 セット 10 回中で 8 回成功しなければ、その水準はクリアできないとみなし、クリアできなかった水準より視認可能な時間が 50ms 多い水準でふりけんを行った。その水準で 10 回中 8 回成功したらそこで遮蔽あり条件を終了し、10 回中 8 回成功しない場合は最長 5 セットまで繰り返して遮蔽あり

⁴ けん玉熟練者は通常ではふりけんを 100%に近い確率で成功させることが可能である。しかし、ここでは実験状況であることの特異性を考慮して、10 回中 8 回の成功が 3 セット連続することを達成基準として設定した。

⁵ 熟練者 A の 1 度目のスクリーニングの遮蔽あり条件を遂行中、500ms の水準において実験者が成功試行を数え間違える事態が生じた。そのため、この水準では、ふりけん 10 回中 7 回の成功数だったにもかかわらず、次の 400ms の水準に移行してしまった。

条件を終了した。下降系列で条件を呈示したのは、ランダム呈示の場合には試行回数が非常に多くなってしまい、実験協力者の疲労による成績低下が生じると考えられたためであった。

遮蔽あり条件のあとは再度遮蔽なし条件を行い、スクリーニングを終えた。遮蔽あり条件前後の遮蔽なし条件を、それぞれ、「統制 1」, 「統制 2」とする。

スクリーニングの後日、実験協力者には、メガネが開閉している状態でふりけんをする練習を行ってもらい、メガネが開閉している状況でふりけんを成功に導く視覚情報を得るための玉・頭部の制御方略を学習してもらった。練習ではスクリーニングで 10 回中 8 回成功した水準より 1 段階(条件により、50ms ないしは 100ms 分に相当)見える時間が少なかった水準でふりけんを 30 セット行ってもらった。練習を 8 回(週 2 回を 4 週間)実施したあと、2 回目のスクリーニングを行った。以後、練習前のスクリーニングを pre-test、練習後のスクリーニングを post-test と呼ぶ。

分析方法

本論文では、2 度のスクリーニングのデータを用いて、けん玉熟練者は視覚情報を得られるようにどのように玉・姿勢の制御をするようになったのかを調べた。その際、遮蔽なし条件の通常のふりけんと遮蔽あり条件で制御が異なっているのか、遮蔽あり条件におけるシャッターの開閉時間によって制御が変化するのか、またそれらの学習に注目した。また、有効な視覚情報を得ようとする玉・姿勢の制御の安定した特性について検討するため、成功試行のみを分析の対象とした⁶。

ふりけん試行の開始と終了は次のように決定した。熟練者は試行を開始する際に振り子状に玉を動かしていたため、玉が熟練者に近づき、かつ、玉の速度が最小となったと

⁶ 熟練者 C の pre-test のシャッターの開く時間が 400ms の水準の 1 セット目において、動作解析装置の不具合で 4 試行目から 10 試行目までのデータを記録することができなかった。そのため、このセットについては、3 試行目までの成功試行のデータを解析対象とした。

きを試行の開始とした。試行の終わりは、けんと玉との接触時とした。

玉の軌道とシャッターの開閉タイミング.

本実験では、視野遮蔽メガネを用いるため、実験協力者は、シャッターが開いている限られた時間で視覚情報を得ようとするであろう。さらに、眼鏡のシャッターの開閉は周期的・規則的であり、実験協力者にはシャッターの開くタイミングが予測できる状況であったと考えられる。したがって、van Santvoord & Beek(1994)において中級ジャグラーが軌道の頂点に引き続く部分で視覚情報を得られるようボールを制御していたのと同じように、けん玉熟練者が情報を得ようとする玉の軌跡部分があるとなれば、シャッターが開くタイミングと玉の軌道や回転の特定の位相が一致し、また、そうなるように玉の操作をすることを考えられた。そこで、けん玉熟練者が視覚情報を得ていたのは、玉がどのような状態にあるときであったのかを玉の軌道、シャッターの開閉データから検討した。同時に、メガネの開く時間の長短に応じてけん玉熟練者が情報を得やすくするように玉の軌道を変化させていたのか、変化させるとしたらどのように変化させたのかを分析した。なお、玉の回転については、今回の分析からは除外したが、すべての成功試行において玉は1回転していた。

頭部運動.

けん玉熟練者がふりけんをするときには、玉の運動に合わせて頭部を動かして視覚の安定化をはかっていることが第1実験で示唆されている。シャッターの開閉に応じて姿勢としての頭部運動を制御することで、玉の動きに関する視覚情報を得やすくすることが可能であると考えられたため、もちろん膝の運動も頭部運動に影響するが、本実験では、頭部運動について検討することとした。

相互相関(CCF).

第 1 実験の結果から、熟練者群では上下方向の玉の運動と頭部運動との間にラグが 0 付近で高い相互相関の値が得られることがわかっている。玉の運動と頭部運動との関係への遮蔽と学習の効果を検討するため、実験 2 においても実験参加者ごとに各試行で相互相関の絶対値の最大値を算出し、それを最大相互相関とした。同時に最大相互相関をとるときのラグの値を算出した。ラグは正の符号をとるときに玉のほうが先行している(身体のほうが遅れている)ことを示す。

玉の相対速度.

ふりけん試行の最終段階では玉とけんが接触することになるが、このようなイベントでは接触のタイミングの知覚が重要であると考えられる。先行研究では、環境(接触する対象)と行為者との相対速度が等速となる場合のほうが加速する場合よりも τ はより正確に接触までの残り時間を見積ると言われている(Lee & Young, 1985)。キャッチング動作の研究では、捕球のためには、ボールと行為者との相対的な運動で決定される光学的加速をなくすように速度制御すること、すなわち接触を等速化することが重要であると言われている(Chapman, 1968; Oudejans et al., 1996 など)。さらに第 1 実験では、けん玉熟練者の頭部運動は、落下する玉の運動を相殺するような制御がなされていることが明らかになっている。したがって、けん玉熟練者のふりけんでは、頭部運動により玉の相対速度を制御することで視覚情報を得やすくしている可能性がある。そのため、頭部中心座標系での玉の速度を算出し、熟練者によるその制御を分析した。

タウカップリング.

ふりけんでは利用される視覚情報について検討するため、実験 2 でも回転の τ と公転の τ のカップリングを検討した。 τ_a と τ_d , $\tau_d(\text{local})$ の算出は、実験 1 と同様の方法で行った。実

験 2 では、頭部運動のカップリングへの影響を調べるために、 $\tau_a \times \tau_d$, $\tau_a \times \tau_d(\text{local})$ のそれぞれの組み合わせでタウカップリングしていた区間の有無を実験 1 と同様の方法で行った。解析可能な試行のうち、タウカップリングしているとみなされた試行数の割合が $\tau_a \times \tau_d$, $\tau_a \times \tau_d(\text{local})$ で異なるのかどうかをカイ 2 乗検定で調べた。次に、Smith et al., (2014)がタウカップリングのカップリング定数 k に対するタスク条件の効果を調べていたように、本研究でも k の値に対する遮蔽の効果を調べた。また、学習の効果を調べた。 k の値を検討するときには、タウカップリングしていた区間の直線回帰の傾きを k を算出した場合と、区間ごとに $k(t)$ を算出した場合を検討した。実験 2 では、カップリングの区間をけん
と玉との接触の 0.30 秒前(0.325 秒前~0.275 秒前), 0.25 秒前(0.275 秒前~0.225 秒前)
0.20 秒前(0.225 秒前~0.175 秒前), 0.15 秒前(0.175 秒前~0.125 秒前), 0.10 秒前(0.125
秒前~0.075 秒前), 0.05 秒前(0.075 秒前~0.025 秒前)の 6 つの区間とした。また、熟練者
C のデータはカップリング区間を検出できないことが多かったため、この分析からは除
外した。

統計解析については、遮蔽に対する制御方略とその学習による変化の個人差を検討す
るため、個人内のデータに対して行った。個人内のデータについて遮蔽と学習の効果を
検討した上で、熟練者にみられる特徴をまとめることとした。本研究では、pre-test と
post-test で実施した水準や各水準での試行数が異なっていた。そこで、欠損データを推
定し、補完した。欠損データの推定には、ランダムな欠損であるという仮定をおき、R パ
ッケージの `Ameria II 1.6.4` (Honaker, King, & Blackwell, 2011)を用い、多重代入法を
行った。補完された 5 組のデータセットに対し、遮蔽 \times test の分散分析を行った。タウカ
ップリングの区間ごとの k を算出する分析では、遮蔽 \times test \times 区間の分散分析を行い、そ
れ以外については遮蔽 \times test の分散分析を行った。5 組のデータのそれぞれから得られた
推定値を用いて、Ragunathan & Dong (2011), Rubin (1987) にしたがってデータを統

合した. 各 test で実施しなかった水準についてもデータの補完を行ったが, 本研究では実際に各 test で実施した水準について報告を行うこととした.

3.2 実験 2 結果

熟練者 3 名の遮蔽あり条件での実施水準

表 5, 6, 7 は, 熟練者 A と熟練者 B と熟練者 C が pre-test と post-test において実施した各水準と, その水準を繰り返したセット数を示している. 遮蔽なし条件(統制 1, 統制 2)では, すべての熟練者は 3 セット行った. この遮蔽なし条件では, ほとんどが成功試行であった. 熟練者 A が pre-test で 1 セット 10 回中 8 回以上ふりけんを成功させることができたときの, シャッターの開く時間が最も短い水準は 400ms であった⁷. post-test では, シャッターが 250ms 開く水準まで 10 回中 8 回以上成功していた. 熟練者 B が pre-test で 1 セット 10 回中 8 回以上ふりけんを成功させることができたときのシャッターの開く時間が最も短い水準は, シャッターが 400ms 開く水準であった. post-test では, シャッターが 200ms 開閉する水準まで 10 回中 8 回以上成功した. 熟練者 C が pre-test で 1 セット 10 回中 8 回以上ふりけんを成功させることができたときのシャッターの開く時間が最も短い水準は, シャッターが 300ms 開く水準であった. post-test では, シャッターが 250ms 開閉する水準まで 10 回中 9 回成功した.

したがって, すべての熟練者で post-test の方がシャッターの開く時間が短い水準でふりけんを成功させていた. すべての熟練者が練習を通じてシャッター開閉下での何らかの制御方略を獲得したのではないかと考えられた.

⁷ シャッター開閉の周期は, シャッターが開いている時間と閉じている時間の合計が常に 1200ms となるように設定した. したがって, シャッターが 400ms 開く場合は 800ms 閉じており, 250ms 開く場合は 950ms 閉じていた.

表 5 熟練者 A の実験での実施水準. pre-test(左)と post-test(右)での実施順に上から水準を記載.

熟練者A pre-test			熟練者A post-test		
遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)	遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)
統制1	3	1194.44 (SD=27.28, n=30)	統制1	3	1247.78 (SD=37.77, n=30)
600ms	1	1182.29 (SD=47.65, n=8)	600ms	1	1415.83 (SD=22.38, n=10)
500ms	1	1147.62 (SD=32.88, n=7)	500ms	1	1391.67 (SD=26.06, n=10)
400ms	3	1199.17 (SD=58.61, n=20)	400ms	1	1420.00 (SD=31.48, n=10)
300ms	5	1197.40 (SD=57.87, n=16)	300ms	1	1457.29 (SD=21.10, n=8)
350ms	5	1238.14 (SD=44.61, n=26)	200ms	5	1469.58 (SD=33.91, n=20)
統制2	3	1221.67 (SD=28.25, n=30)	250ms	1	1452.08 (SD=33.85, n=8)
			統制2	3	1283.61 (SD=30.44, n=30)

表 6 熟練者 B の実験での実施水準. pre-test(左)と post-test(右)での実施順に上から水準を記載.

熟練者B pre-test			熟練者B post-test		
遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)	遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)
統制1	3	1217.50 (SD=32.49, n=30)	統制1	3	1175.86 (SD=27.13, n=29)
600ms	4	1189.89 (SD=52.03, n=15)	600ms	1	1220.83 (SD=29.88, n=8)
500ms	4	1237.50 (SD=28.80, n=26)	500ms	1	1218.33 (SD=24.78, n=10)
400ms	3	1221.03 (SD=20.69, n=21)	400ms	1	1227.50 (SD=24.86, n=10)
300ms	5	1232.87 (SD=35.06, n=18)	300ms	1	1254.63 (SD=22.86, n=9)
350ms	5	1258.07 (SD=42.20, n=32)	200ms	1	1281.25 (SD=18.23, n=8)
統制2	3	1271.60 (SD=23.26, n=27)	100ms	5	1307.84 (SD=21.34, n=17)
			150ms	5	1278.16 (SD=20.70, n=29)
			統制2	3	1188.79 (SD=27.39, n=29)

表 7 熟練者 C の実験での実施水準. pre-test(左)と post-test(右)での実施順に上から水準を記載.

熟練者Cの実施水準					
熟練者C pre-test			熟練者C post-test		
遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)	遮蔽水準	繰り返したセット数	試行時間(ms)
統制1	3	1249.40 (SD=72.18, n=28)	統制1	3	1230.28 (SD=33.51, n=30)
600ms	4	1377.90 (SD=32.43, n=23)	600ms	2	1282.22 (SD=43.17, n=15)
500ms	1	1417.59 (SD=30.17, n=9)	500ms	1	1273.33 (SD=28.81, n=10)
400ms	2	1382.50 (SD=42.39, n=10)	400ms	1	1300.93 (SD=32.39, n=9)
300ms	5	1387.76 (SD=50.00, n=32)	300ms	2	1289.29 (SD=20.78, n=14)
200ms	5	1372.08 (SD=41.65, n=20)	200ms	5	1323.96 (SD=37.45, n=24)
250ms	5	1357.89 (SD=37.11, n=19)	250ms	2	1287.88 (SD=31.70, n=11)
統制2	3	1267.56 (SD=49.19, n=28)	統制2	3	1195.56 (SD=35.47, n=30)

玉の軌道とシャッターの開閉タイミング

玉の軌道と視野遮蔽シャッターの開閉タイミングとの関係から、視覚的に特定の軌跡区間が選択されているのかを調べた。図 23, 24 は、それぞれ、熟練者 A の pre-test, post-test, 図 25, 26 は熟練者 B の pre-test, post-test, 図 27, 28 は熟練者 C の pre-test, post-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミングを示すものである。シャッターの開閉タイミングについては、pre-test では図 23, 25, 27 のように、熟練者 A も B も C も玉を返して⁸以降にシャッターが開く傾向があった。一方、post-test では、図 24, 26, 28 のように 3 人の熟練者とも、玉の軌道の頂点付近でシャッターが開くようになっており、熟練者 A については、試行の開始直後にもシャッターが開いていた。熟練者 C もシャッターの開いている時間が長い水準で試行の開始直後にもシャッターが開く傾向があった。玉の軌道上でのシャッターの開くタイミングの散らばりについて、pre-test と post-test で比較するため、a) シャッターが開き始めてから玉が頂点に到達するまでの時間 T_{open} と、b)

⁸ 手前から前方へと振り子上に振り出した玉を、再び手間に引き戻す動作を「玉を返す」と呼ぶ。

玉の軌道が頂点に到達してからシャッターが開き終わるまでの時間 T_{close} を熟練者ごとに各試行で計算し⁹, その時間の分散について F 検定を行った(表 8). シャッターの遮蔽時間の水準により T_{open} , T_{close} が変化すると考えられたため, 両 test に共通して実施した各水準について, この F 検定は実施された. その結果, 熟練者 A と B は, T_{open} , T_{close} のすべての水準で, post-test のほうが pre-test よりも分散が有意に小さかった($p < .05$). 熟練者 C は, T_{open} についても T_{close} についても, 250ms と 500ms 以外の水準で post-test のほうが pre-test よりも分散が小さかった($p < .05$). 250ms と 500ms の水準では分散が異なるとは言えなかった. したがって, 熟練者 A も熟練者 B も, post-test のほうが pre-test よりも玉の軌道上でのシャッターの開閉タイミングがより一致していたと言えるだろう. 熟練者 C は, 水準によっては両 test 間で開閉タイミングの分散が異なるとは言えなかったが, 多くの場合, 実験条件におけるシャッターの開閉タイミングは, post-test のほうが pre-test よりも一致していた.

⁹ T_{open} は玉が頂点に到達したポイントからシャッターが開き始めたポイントの差, T_{close} はシャッターが開き終わったポイントから玉が頂点に到達したポイントの差から時間を計算した.

表 8 熟練者 A(上)と熟練者 B(中)と熟練者 C(下)のシャッターが開き始めてから玉が頂点に到達するまでの時間 $T_{open}(ms)$ と玉の軌道が頂点に到達してからシャッターが開き終わるまでの時間 $T_{close}(ms)$.

熟練者A						
遮蔽水準	T_{open}		F検定	T_{close}		F検定
	pre-test	post-test		pre-test	post-test	
200ms		116.25 (SD=52.25, n=20)			85.42 (SD=50.50, n=20)	
250ms		116.67 (SD=47.14, n=8)			135.42 (SD=46.24, n=8)	
300ms	227.60 (SD=120.71, n=16)	118.75 (SD=33.85, n=8)	12.72**	71.88 (SD=121.64, n=16)	181.25 (SD=33.85, n=8)	12.91**
350ms	184.29 (SD=105.71, n=26)			156.09 (SD=96.60, n=26)		
400ms	217.50 (SD=98.49, n=20)	190.00 (SD=33.75, n=10)	8.52**	157.92 (SD=67.62, n=20)	206.67 (SD=25.40, n=10)	7.09**
500ms	400.00 (SD=145.699, n=7)	250.83 (SD=38.78, n=10)	14.11***	85.71 (SD=137.33, n=7)	232.50 (SD=33.21, n=10)	17.10***
600ms	605.21 (SD=145.91, n=8)	298.33 (SD=60.71, n=10)	5.78*	-13.54 (SD=137.86, n=8)	263.33 (SD=28.38, n=10)	23.59***

*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

熟練者B						
遮蔽水準	T_{open}		F検定	T_{close}		F検定
	pre-test	post-test		pre-test	post-test	
100ms		63.24 (SD=55.44, n=17)			34.80 (SD=55.76, n=17)	
150ms		84.20 (SD=43.21, n=29)			64.08 (SD=42.21, n=29)	
200ms		115.63 (SD=53.53, n=8)			84.37 (SD=53.53, n=8)	
300ms	267.13 (SD=74.34, n=18)	151.85 (SD=23.12, n=9)	10.34**	32.87 (SD=74.34, n=18)	145.37 (SD=22.86, n=9)	10.57**
350ms	189.84 (SD=62.53, n=32)			160.16 (SD=62.53, n=32)		
400ms	397.22 (SD=81.02, n=21)	195.83 (SD=38.94, n=10)	4.33*	1.98 (SD=80.66, n=21)	199.17 (SD=37.57, n=10)	4.61*
500ms	358.65 (SD=125.77, n=26)	290.83 (SD=25.29, n=10)	24.73***	130.77 (SD=110.17, n=26)	205.83 (SD=25.17, n=10)	19.16***
600ms	482.78 (SD=199.89, n=15)	378.13 (SD=29.86, n=8)	44.81***	97.78 (SD=185.31, n=15)	214.58 (SD=27.73, n=8)	44.66***

*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

熟練者C						
遮蔽水準	T_{open}		F検定	T_{close}		F検定
	pre-test	post-test		pre-test	post-test	
200ms	158.33 (SD=60.09, n=20)	72.57 (SD=38.42, n=24)	2.45*	39.58 (SD=59.72, n=20)	126.39 (SD=38.28, n=24)	2.43*
250ms	184.65 (SD=56.33, n=19)	125.76 (SD=58.03, n=11)	n.s	64.04 (SD=56.39, n=19)	120.45 (SD=58.02, n=11)	n.s
300ms	207.29 (SD=107.09, n=32)	130.95 (SD=26.44, n=14)	16.41***	79.95 (SD=72.92, n=32)	167.26 (SD=24.99, n=14)	8.51***
400ms	259.17 (SD=73.01, n=10)	104.63 (SD=27.99, n=9)	6.81*	139.17 (SD=71.69, n=10)	264.81 (SD=22.74, n=9)	9.94**
500ms	297.22 (SD=65.48, n=9)	167.50 (SD=43.29, n=10)	n.s	178.70 (SD=43.32, n=9)	249.17 (SD=23.39, n=10)	n.s
600ms	342.03 (SD=131.65, n=23)	248.89 (SD=59.75, n=15)	4.85**	202.54 (SD=83.88, n=23)	230.56 (SD=32.68, n=15)	6.59***

*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

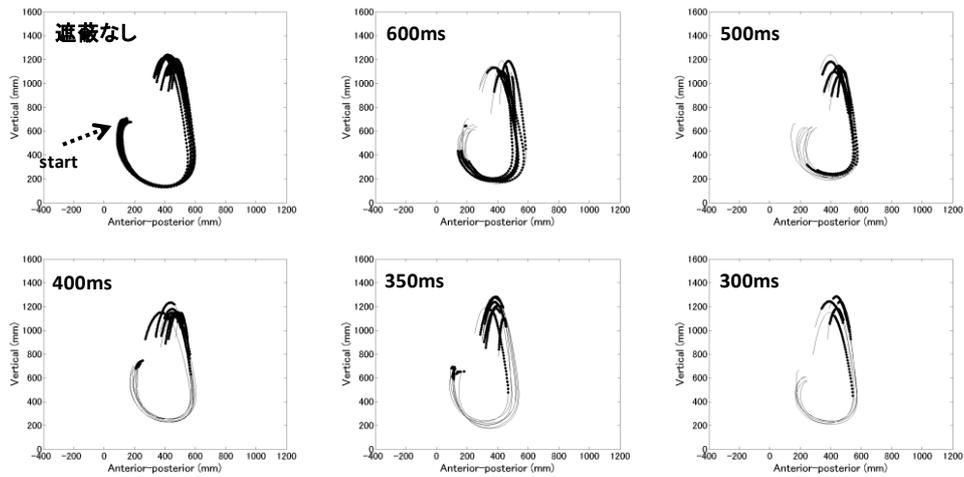


図 23 熟練者 A の pre-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 遮蔽なし条件と遮蔽あり条件の各水準の代表的な 1 セットの成功試行の玉の軌道をプロットしたもの. 横軸が前後方向, 縦軸が上下方向であり, 図の濃い点線はシャッターが開いていたタイミングに相当する.

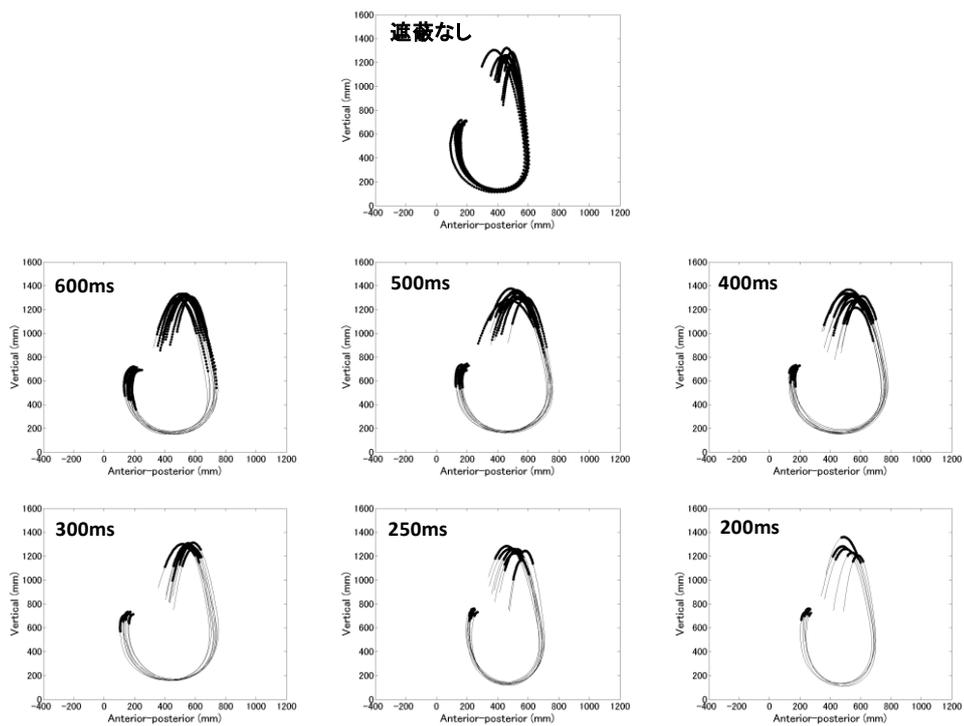


図 24 熟練者 A の post-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 図の見方は図 23 と同様.

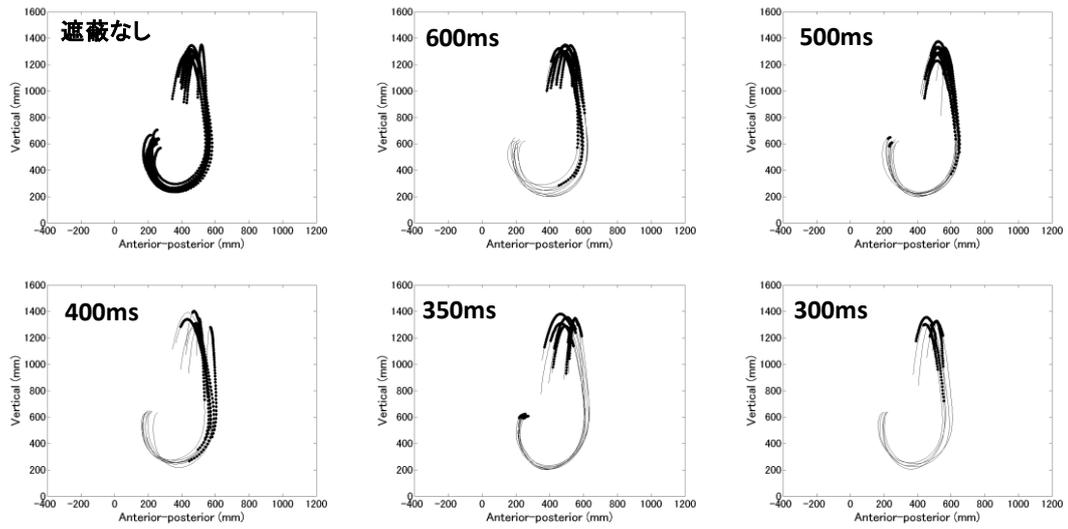


図 25 熟練者 B の pre-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 図の見方は図 23 と同様.

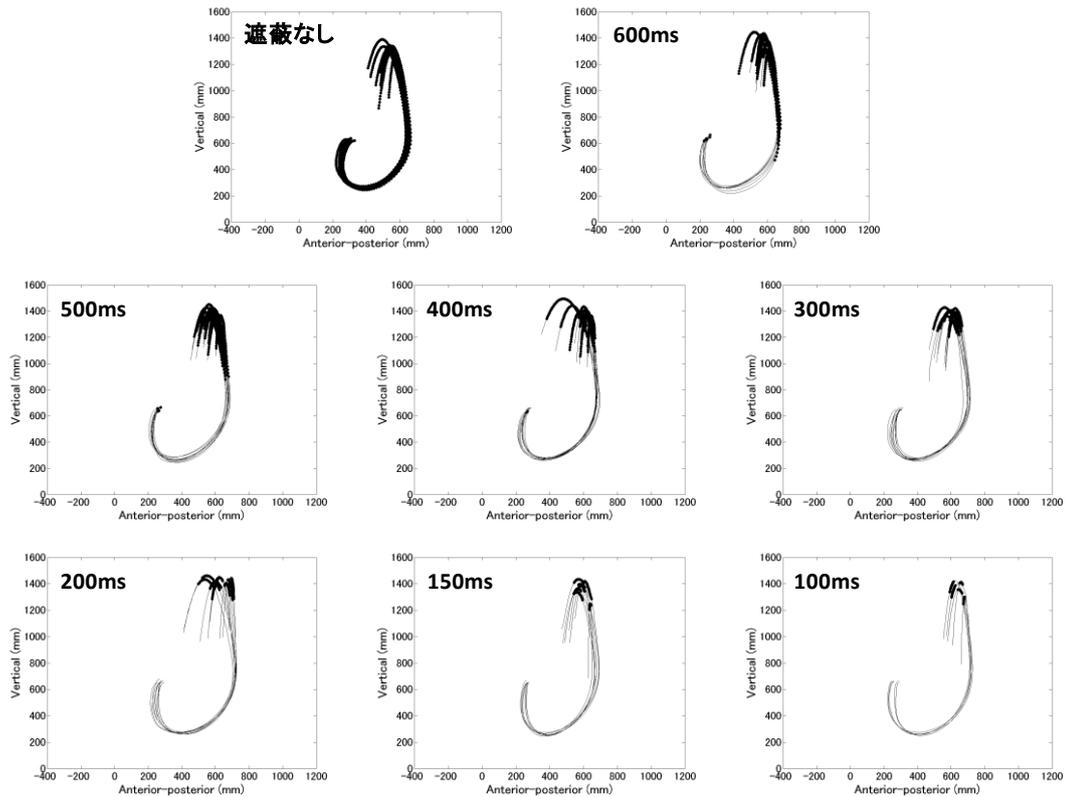


図 26 熟練者 B の post-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 図の見方は図 23 と同様.

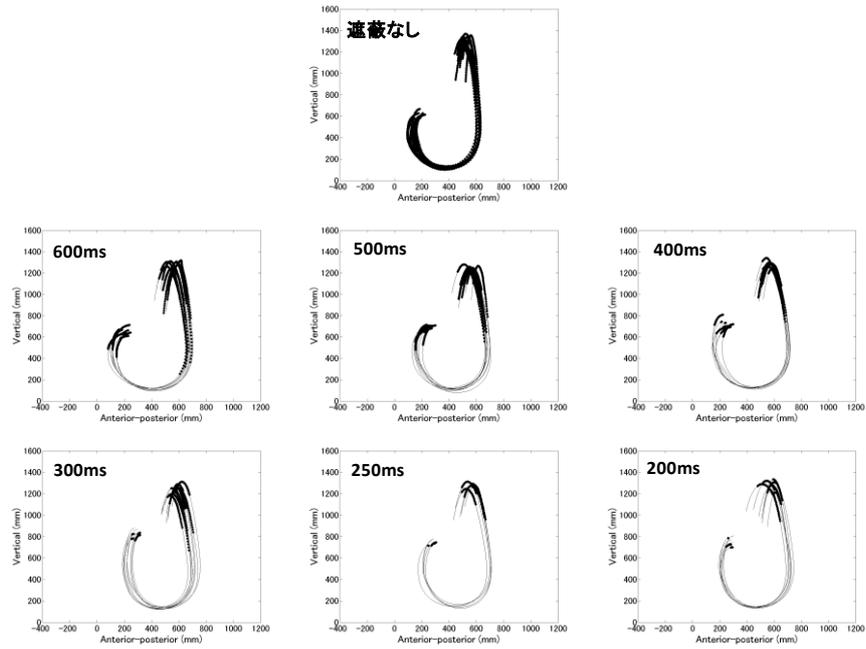


図 27 熟練者 C の pre-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 図の見方は図 23 と同様.

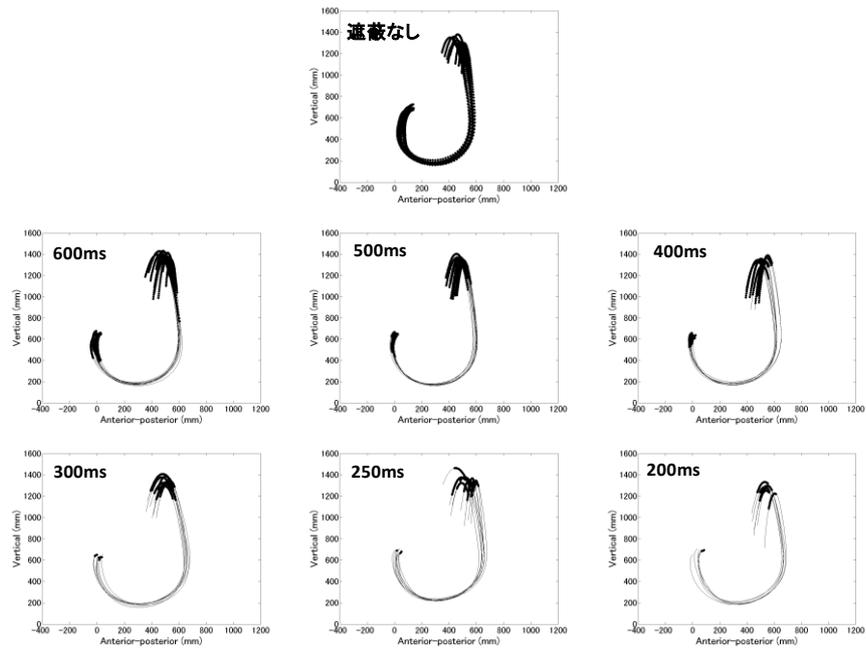


図 28 熟練者 C の post-test における玉の軌道とシャッターの開閉タイミング. 図の見方は図 23 と同様.

玉の前後・上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度

熟練者 A の玉の軌道. 熟練者 A の玉の軌道は, pre-test では遮蔽あり条件で全体として小さくなる傾向があったが(図 23), post-test(図 24)では前後方向に軌道が長くなっており, さらに, シャッターの開いている時間が相対的に長い水準(600ms など)のほうが短い水準(200ms など)よりも前後方向に軌道が長くなっているようであった. 熟練者 A の post-test では, 試行の開始直後と玉の頂点付近でシャッターが開いており, またシャッターの開閉時間の水準に応じて軌道の長さに変化があることから, シャッターの開くタイミングに玉の軌道が頂点付近に到達するよう玉を制御していたのではないかと考えられた. そこで, 各試行の試行開始から玉が軌道の頂点に達するまでの時系列を対象として, 玉の運動の前後・上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度(軌跡長/時間)を pre-test と post-test の各試行で算出し(図 29), 遮蔽の効果(遮蔽なし条件の 2 水準と遮蔽あり条件の各水準)と学習の効果(pre-test/post-test)を分散分析により検討した.

分散分析の結果, 玉の前後・上下方向の範囲, 軌跡長, 速度のすべてにおいて遮蔽と学習の主効果, 遮蔽と学習の交互作用に有意差があった[遮蔽, 学習の主効果, 交互作用の順に, 前後範囲: $F(7.47, 39.88)=21.37, p < .001, F(1.00, 13.30)=1351.38, p < .001, F(7.94, 138.01)=83.49, p < .001$; 上下範囲: $F(5.31, 19.66)=11.33, p < .001, F(0.99, 13.36)=1034.04, p < .001, F(6.40, 38.39)=14.30, p < .001$; 軌跡長: $F(6.34, 27.56)=20.33, p < .001, F(0.99, 6.18)=2681.63, p < .001, F(3.53, 89.73)=33.69, p < .001$; 速度: $F(7.81, 22.93)=119.89, p < .001, F(0.96, 9.10)=166.93, p < .001, F(4.41, 76.15)=11.19, p < .001$]. 単純主効果の検定結果を表 9 に示した. pre-test では, 玉の前後方向移動範囲と上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度は, 遮蔽あり条件のほうが統制条件よりも値が小さかった. 一方, post-test では, 前後方向移動範囲, 軌跡長については, pre-test とは逆に, 遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりもその値が大きくなっていた. また, 両 test で共通して実施した遮蔽あり条件の同一水準の比較では, post-test のほうが pre-test よりも前後方向範

囲, 軌跡長の値が大きかった. 上下方向移動範囲は, post-test では遮蔽の単純主効果は有意ではなかったが, 両 test とともに実施した遮蔽あり条件の同一水準の比較では, post-test のほうが pre-test よりも値が大きかった. 速度は, pre-test も post-test も遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が小さかったが, 両 test で実施した遮蔽あり条件の同一水準において post-test のほうが pre-test よりも値が大きかった. 前後方向範囲と速度は, post-test では, シャッターの開いている時間が短い水準のほうが長い水準よりも値が小さい傾向があった.

熟練者Bの玉の軌道. 熟練者Bについても, post-test では玉が頂点に到達するときにシャッターが開いていた. 熟練者Bもシャッターの開閉時間によって玉の軌道を変化させてシャッターが開いたときに玉の軌道が頂点に到達するようにしているのか検討するため, 玉の前後・上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度について pre-test と post-test の各試行で算出し(図 29), 欠損データを補完して, 遮蔽と学習を要因とする分散分析を行った. その結果, 玉の上下方向移動範囲と軌跡長は2つの主効果と交互作用が有意であった[遮蔽, 学習の主効果, 交互作用の順に, 上下範囲: $F(7.41, 172.86)=9.73, p < .001, F(0.89, 6.89)=71.49, p < .001, F(6.17, 55.92)=4.50, p < .001$; 軌跡長: $F(6.72, 47.27)=15.62, p < .001, F(0.83, 7.96)=46.90, p < .001, F(4.43, 56.40)=3.03, p < .05$]. 玉の前後方向移動範囲と速度は, 遮蔽と学習の主効果が有意であった [前後範囲: $F(6.32, 30.53)=40.73, p < .001, F(0.99, 18.67)=366.86, p < .001$; 速度: $F(7.40, 177.23)=9.84, p < .001, F(0.97, 15.99)=355.23, p < .001$]. 下位検定の結果は, 表 10 に示した. 上下方向範囲は, pre-test では, 単純主効果は有意ではなかったが, post-test では, 遮蔽なし条件のほうが遮蔽あり条件よりも値が小さく, 150ms は 200ms よりも値が小さかった. 両 test で実施した 400ms, 500ms, 600ms の水準では, post-test のほうが pre-test よりも値が大きかった. 軌跡長については, pre-test では遮蔽あり条件の 600ms 以外の水準が統制 1 よりも, 400ms と 500ms は統制 2 よりも値が大きかったが, post-test では, 遮蔽あり条件のすべ

ての水準で遮蔽なし条件よりも値が大きかった。軌跡長は、両 test で実施した 500ms の水準のみ post-test のほうが pre-test よりも大きかった。玉の前後方向範囲は、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きく、速度も、遮蔽あり条件のほとんどの水準は遮蔽なし条件よりも値が大きかった。また、前後方向範囲も速度も post-test のほうが pre-test よりも値が大きかった。熟練者 B においては、遮蔽なし条件より遮蔽あり条件のほうが玉の前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度が大きくなる傾向があったが、pre-test も post-test も、遮蔽あり条件のシャッター開閉時間の長短で玉の運動に差があるとは言えず、この点で熟練者 A とは異なっていた。

熟練者 C の玉の軌道の変化。 熟練者 C についても同様に、シャッターの開閉時間によって玉の軌道を変化させてシャッターが開いたときに玉の軌道が頂点に到達するようにしているのか検討した。玉の前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度について pre-test と post-test の各試行で算出し(図 29)、分散分析を行った。その結果、玉の運動の前後方向移動範囲、軌跡長、速度において遮蔽と学習の主効果、遮蔽と学習の交互作用に有意差があった[遮蔽、学習の主効果、交互作用の順に、前後範囲: $F(6.48, 71.74)=77.92, p < .001$, $F(1.00, 24.72)=1436.76, p < .001$, $F(6.31, 44.29)=39.34, p < .001$; 軌跡長: $F(6.72, 110.66)=45.57, p < .001$, $F(0.96, 23.27)=96.79, p < .001$, $F(6.27, 128.77)=8.58, p < .001$; 速度: $F(3.17, 36.49)=4.93, p < .05$, $F(0.99, 29.04)=197.27, p < .001$, $F(5.90, 41.73)=6.12, p < .001$]。上下方向の範囲は遮蔽の主効果と遮蔽と学習の交互作用が有意であった[それぞれ, $F(6.41, 113.22)=32.72, p < .001$, $F(6.25, 191.84)=7.52, p < .001$]。下位検定の結果は表 11 に示した。熟練者 C の遮蔽の単純主効果は、pre-test では軌跡長で、post-test では前後方向移動範囲において遮蔽の有無による差があり、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きかった。pre-test における速度の単純主効果に有意差は認められなかったが、それ以外は、シャッターの開いている時間が相対的に長い水準のほうが、遮蔽なし条件やシャッターの開いている時間が短い水準よりも値が大きかつ

た。この傾向は熟練者 A の post-test の軌跡長と同様のものであり、シャッターの開閉時間による玉の運動の値の変化という点でも熟練者 A と類似していた。学習の単純主効果については、前後方向範囲と速度ではすべての水準で post-test のほうが pre-test よりも値が大きく、軌跡長では 600ms 以外の水準で post-test のほうが pre-test よりも値が小さかった。上下方向範囲では test 間で変化はみられなかった。

以上、玉の運動(前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度)の結果を要約する。Pre-test では、玉の運動に対する遮蔽の効果が熟練者によって異なっていた。熟練者 A では、玉の運動は遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも小さかった。一方で、熟練者 B と熟練者 C では、玉の運動は遮蔽あり条件で前後に長い軌道になっていた。post-test では、統計解析したすべての項目に対して遮蔽の効果が全く同じではないが、全熟練者で前後方向の玉の運動が遮蔽あり条件で長くなっていた。また、熟練者 A と熟練者 C では、遮蔽時間の長短で玉の運動を調整していた。玉の運動とシャッターの開閉タイミングの結果も考慮に入れると、すべての熟練者は、練習を経て、遮蔽の有無や遮蔽時間によって玉の前後方向の運動を調整し、玉の軌道の頂点付近という軌跡部位を視認できるようにしていたと考えられる。

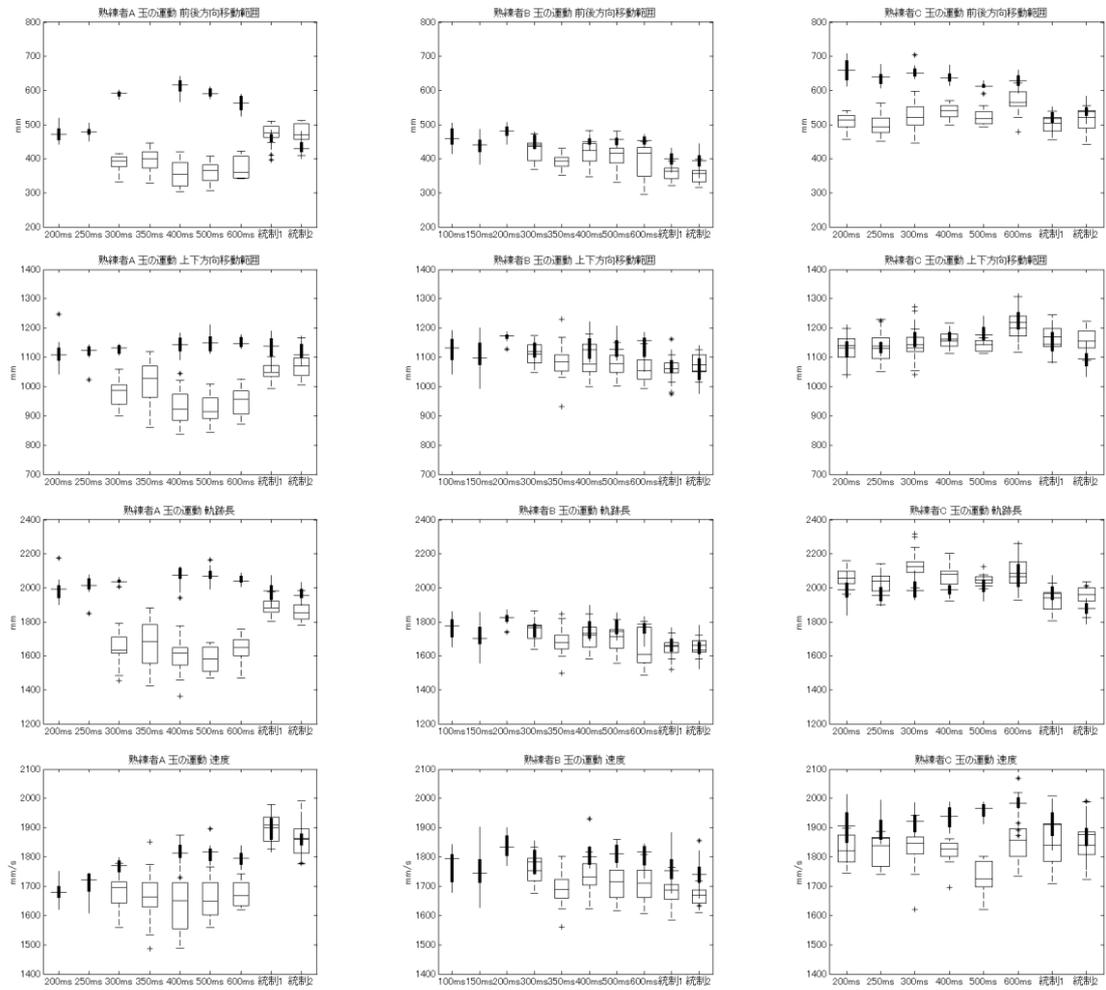


図 29 熟練者 A(左列), 熟練者 B(中列), 熟練者 C(右列)の玉の運動. 頭部運動の前後方向移動範囲(上段), 上下方向移動範囲(上中段), 軌跡長(下中段), 速度(下段). 白抜きの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

表 9 熟練者 A の玉の運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の単純主効果の検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表中の遮蔽なしは統制 1, 2 を, 遮蔽ありはシャッターの開閉のあったすべての水準を示す.

要因	熟練者A			
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)
pre-test	遮蔽なし>遮蔽あり 350ms, 600ms>400ms	遮蔽なし>遮蔽あり 350ms>遮蔽ありの 350ms以外 300ms>400ms	遮蔽なし>遮蔽あり 350ms>400ms	遮蔽なし>遮蔽あり 400ms<600ms
遮蔽 post-test	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2 200ms<遮蔽ありの 200ms以外 250ms<400ms, 500ms, 600ms 300ms<500ms	n.s.	統制1<400ms, 500ms, 600ms 統制2<遮蔽あり 200ms<500ms	遮蔽なし>遮蔽あり 統制1>統制2 200ms<300ms, 400ms, 500ms, 600ms 250ms<400ms, 500ms, 600ms 300ms<500ms
学習	300ms 400ms 500ms 600ms	pre<post pre<post pre<post pre<post	pre<post pre<post pre<post pre<post	pre<post pre<post pre<post pre<post

表 10 熟練者 B の玉の運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の下位検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者B			
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)
pre-test		n.s.	統制1<遮蔽ありの 600ms以外 統制2<400ms, 500ms	
遮蔽 post-test	遮蔽なし<遮蔽あり	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2 150ms<200ms	遮蔽なし<遮蔽あり 150ms<200ms	統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの 300ms以外
学習	300ms 400ms 500ms 600ms	pre<post	n.s. pre<post pre<post pre<post	n.s. n.s. pre<post n.s.

表 11 熟練者 C の玉の運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の単純主効果の検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者C				
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)	
pre-test	統制1<300ms, 400ms, 500ms, 600ms 統制2<600ms 200ms, 250ms<400ms, 600ms 300ms, 400ms, 500ms<600ms	遮蔽なし, 遮蔽ありの600ms以外<600ms 遮蔽なし, 400ms, 500ms>200ms, 250ms 統制1>300ms	遮蔽なし<遮蔽あり 200ms, 250ms, 400ms, 500ms<300ms	n.s.	
遮蔽 post-test	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1<統制2 200ms<250ms	統制1<500ms, 600ms 統制2<遮蔽あり 統制1>統制2 200ms<300ms, 400ms, 500ms, 600ms 250ms<400ms, 500ms, 600ms 300ms<500ms, 600ms 400ms<600ms	統制1<500ms, 600ms 統制2<遮蔽あり 統制1>統制2 200ms, 300ms<600ms 250ms<500ms, 600ms	統制1<500ms, 600ms 統制2<300ms, 400ms, 500ms, 600ms 統制1>統制2 200ms, 250ms<500ms, 600ms 250ms<400ms, 500ms, 600ms 300ms<600ms	
学習	200ms	pre<post	n.s.	pre>post	pre<post
	250ms	pre<post	n.s.	pre>post	pre<post
	300ms	pre<post	n.s.	pre>post	pre<post
	400ms	pre<post	n.s.	pre>post	pre<post
	500ms	pre<post	n.s.	pre>post	pre<post
	600ms	pre<post	n.s.	n.s.	pre<post

頭部運動

視覚情報を得やすくすることは玉の制御だけではなく頭部運動の制御によっても達成されると考えられるため, 頭部運動についても続いて検討した. すべての熟練者で, 頭部は, 玉を振り出すときには下前方に動いて上下方向の運動が最小値をとり, 玉を返して以降は頭部も上に動き, 玉の軌道が頂点に到達するところで頭部もおおよそ上下方向の運動が最大値をとっていた. 頭部運動が上下方向での最大値をとる付近でシャッターが開いていた. 以降, 玉の落下とともに, 頭部も下に動いていた(図 30~図 35). 熟練者 A も熟練者 B も熟練者 C も post-test では, 頭部運動の上下方向の最大値が遮蔽あり条件で大きくなっており, 上下方向の移動範囲が大きくなっていると考えられた. また, 上

下方向の頭部運動が最大値をとる時点は、シャッターが開くタイミングに相当するため、重要な変化であると考えられた。

見ることへの頭部の役割を考えた場合に、玉を返して以降の視知覚が重要になる局面において頭部運動が積極的に関与しているのではないかと考えられた。そこで、各試行で頭部運動が上下方向の最小値をとってから試行の終了までの時系列を対象として、頭部の前後・上下方向の移動範囲、軌跡長、速度をそれぞれの熟練者の pre-test と post-test の各試行で算出した(図 36)。それらの値が遮蔽と学習を要因として変化するのかを、欠損データを補完して分散分析を行うことにより検討した。

熟練者 A の頭部運動。 分散分析の結果、頭部運動の上下方向移動範囲、軌跡長、速度は主効果、交互作用ともに有意であった[遮蔽、学習の主効果、交互作用の順に、上下範囲： $F(5.29, 60.76)=11.22, p <.001, F(0.99, 6.48)=1367.65, p <.001, F(3.16, 77.50)=22.17, p <.001$ ；軌跡長： $F(6.29, 68.43)=26.05, p <.001, F(0.98, 13.62)=965.63, p <.001, F(6.03, 136.93)=19.31, p <.001$ ；速度： $F(5.64, 66.46)=16.53, p <.001, F(0.97, 15.21)=473.53, p <.001, F(3.65, 163.26)=9.05, p <.001$]。頭部運動の前後方向移動範囲は遮蔽の主効果のみ有意であった[$F(7.31, 130.48)=10.71, p <.001$]。下位検定結果は表 12 に示した。分析結果をまとめると、pre-test では、熟練者 A の頭部運動の上下方向移動範囲、軌跡長、速度については遮蔽の有無によって値に差があるとは言えず、遮蔽あり条件のシャッターの開く時間の長短で値に差があるとも言えなかった。Post-test では、調べた項目はすべて、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きくなっていた。さらに、軌跡長については、200ms、250ms が 500ms の水準より値が大きく、速度では 200ms は 500ms と 600ms の水準よりも、250ms は 500ms の水準よりも値が大きく、シャッターの開く時間が短い水準のほうが、軌跡長が長くなり、速度が大きくなる傾向があると考えられた。Pre-test と post-test と比較して、両 test とともに試行されたすべての水準で post-test のほうが pre-test よりも頭部運動の各値が大きくなっていた。頭部運動

の前後方向範囲は、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きかったが、学習の効果は認められなかった。

熟練者 B の頭部運動. 熟練者 B の頭部運動の前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度について、遮蔽と学習を要因とする分散分析を実行した。その結果、算出したすべての項目について、遮蔽、学習の主効果と交互作用がみられた。[遮蔽、学習の主効果、交互作用の順に、前後範囲: $F(6.67, 67.56)=15.97, p<.001, F(0.87, 9.90)=41.39, p<.001, F(7.97, 153.96)=7.57, p<.001$; 上下範囲: $F(8.12, 38.34)=75.38, p<.001, F(0.79, 8.76)=28.14, p<.001, F(6.55, 69.18)=15.50, p<.001$; 軌跡長: $F(8.03, 86.02)=57.59, p<.001, F(0.89, 11.51)=47.59, p<.001, F(7.35, 31.18)=17.21, p<.001$; 速度: $F(7.81, 82.25)=51.24, p<.001, F(0.95, 12.23)=122.90, p<.001; F(7.09, 43.05)=15.74, p<.001$]. 単純主効果の検定結果は、表 13 に示した。熟練者 B の頭部運動は、pre-test では、遮蔽あり条件の水準によっては統制 1 あるいは統制 2 と差があったが、そのような場合、統制 1 は遮蔽あり条件のその水準よりも値が小さいのに対して、統制 2 は値が大きい、あるいは差があるとは言えなかった。したがって、遮蔽の有無で頭部運動の制御が異なるとは言えなかった。加えて、遮蔽あり条件で遮蔽時間の長短で頭部運動が変化するという明確な傾向はなかった。一方 post-test では、ほとんどの場合、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きかった。遮蔽あり条件では、シャッターの開いている時間が短いほど値が大きくなる傾向があった。この傾向は熟練者 A にもみられたが、熟練者 B のほうがより複数の水準間に認められた。熟練者 B の頭部運動は、pre-test と post-test の同一水準を比較した場合に、あまり変化が見られず、頭部運動の前後方向移動範囲以外で両 test で共通して実施したすべての水準で変化の見られた熟練者 A と対照的であった。

熟練者 C の頭部運動. 熟練者 C の頭部運動の前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度について、遮蔽と学習を要因とする分散分析を実行した。その結果、頭部運動の上下方向移動範囲、軌跡長、速度では、主効果、交互作用がともに有意であった[遮蔽、学習の主

効果, 交互作用の順に, 上下範囲: $F(6.68, 73.17)=207.90, p <.001, F(0.99, 16.21)=466.62, p <.001, F(6.11, 55.46)=4.55, p <.001$; 軌跡長: $F(6.24, 101.75)=97.86, p <.001, F(0.98, 24.21)=96.75, p <.001, F(6.00, 39.03)=6.75, p <.001$; 速度: $F(6.93, 115.91)=100.06, p <.001, F(0.99, 26.48)=396.01, p <.001, F(6.56, 173.08)=4.22, p <.001$]. 前後方向移動範囲は遮蔽の主効果のみ有意であった [$F(5.31, 153.80)=8.90, p <.001$]. 下位検定の結果は表 14 に示した. 頭部運動の上下方向範囲, 軌跡長, 速度は, pre-test も post-test も遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きかった. 前後方向範囲も, ほとんどの場合, 遮蔽あり条件の水準のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きかった. また, 両 test とともに, 特に上下方向範囲においてシャッターの開いている時間が短い水準のほうが長い水準よりも値が小さかった. この傾向は熟練者 A, B とは逆であった. 一方, 前後方向範囲では, 200ms と 250ms は 500ms よりも値が大きかった. 学習の単純主効果より, 上下方向範囲と速度は, すべての遮蔽あり水準で pre-test のほうが post-test よりも値が大きく, 軌跡長は 250ms と 600ms において pre-test のほうが post-test よりも値が大きかった. 熟練者 A の場合は学習の効果がみられた場合には, post-test のほうが pre-test よりも値が大きくなっていったが, 熟練者 C の場合は post-test のほうが値は小さかった. 熟練者 C の頭部運動では, ほかの 2 人の熟練者とは異なり, pre-test と post-test の両方で遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きいという差がみられた.

以上, 頭部の運動(前後・上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の結果を要約する. Pre-test では, 頭部の運動に対する遮蔽の効果が熟練者によって異なっていた. 熟練者 A と熟練者 B では, 頭部運動は遮蔽の有無で差があるとは言えなかった. 一方で, 熟練者 C では, 頭部運動は遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも上下に大きくなっていった. Post-test では, 統計解析したすべての項目に対して遮蔽の効果が全く同じではないが, 全熟練者で上下方向の頭部の運動が遮蔽あり条件で大きくなっていった. また, すべての

熟練者が遮蔽時間の長さによって頭部の運動を調整する傾向がみられ、熟練者 B で特に顕著であった。すべての熟練者は、練習を経て、遮蔽の有無や遮蔽時間によって頭部の上下方向の運動を調整するようになったと言える。

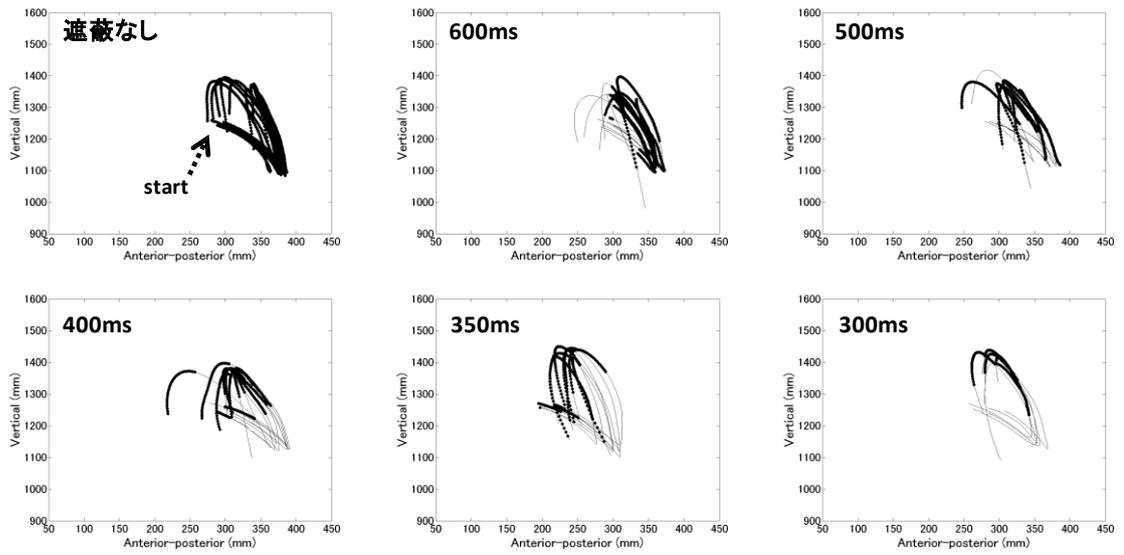


図 30 熟練者 A の pre-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

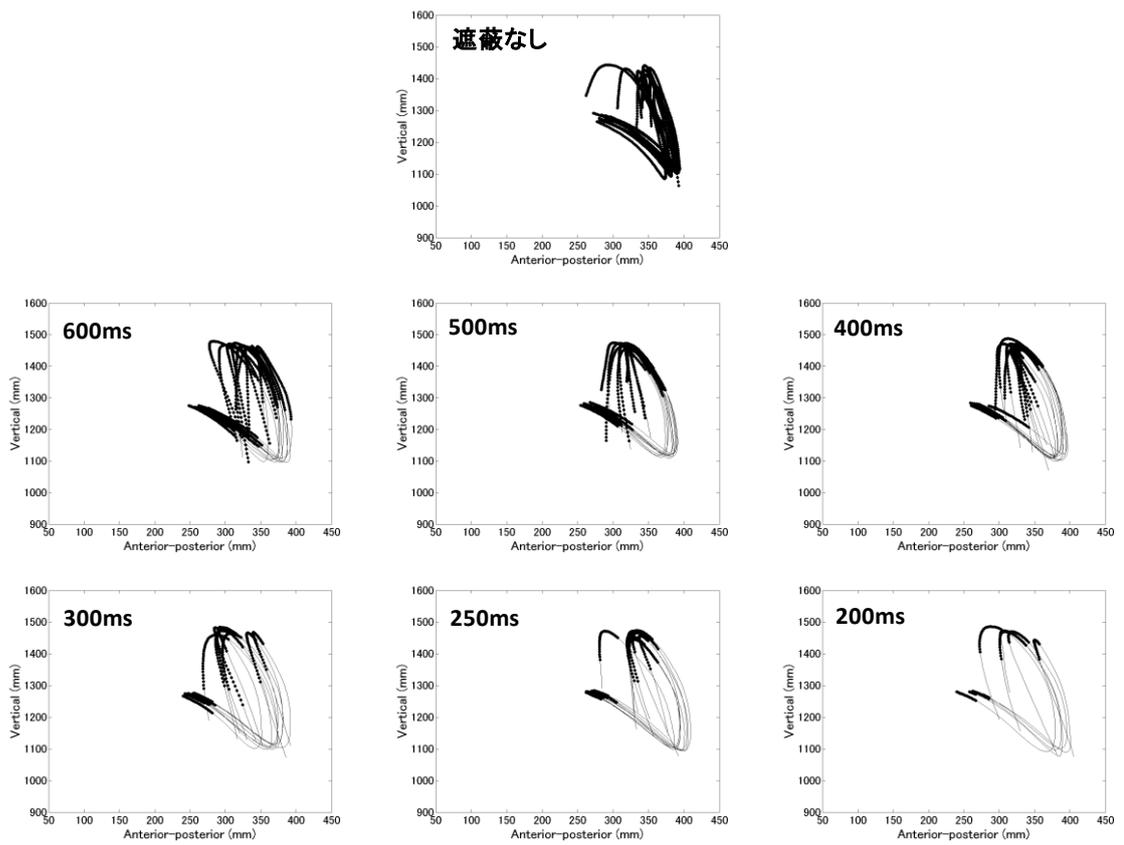


図 31 熟練者 A の post-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

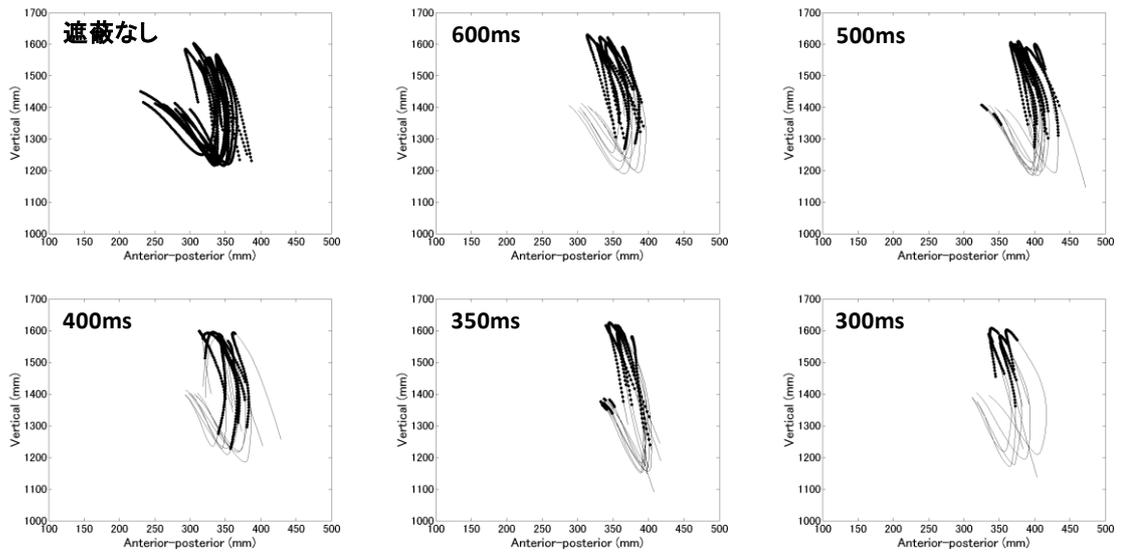


図 32 熟練者 B の pre-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

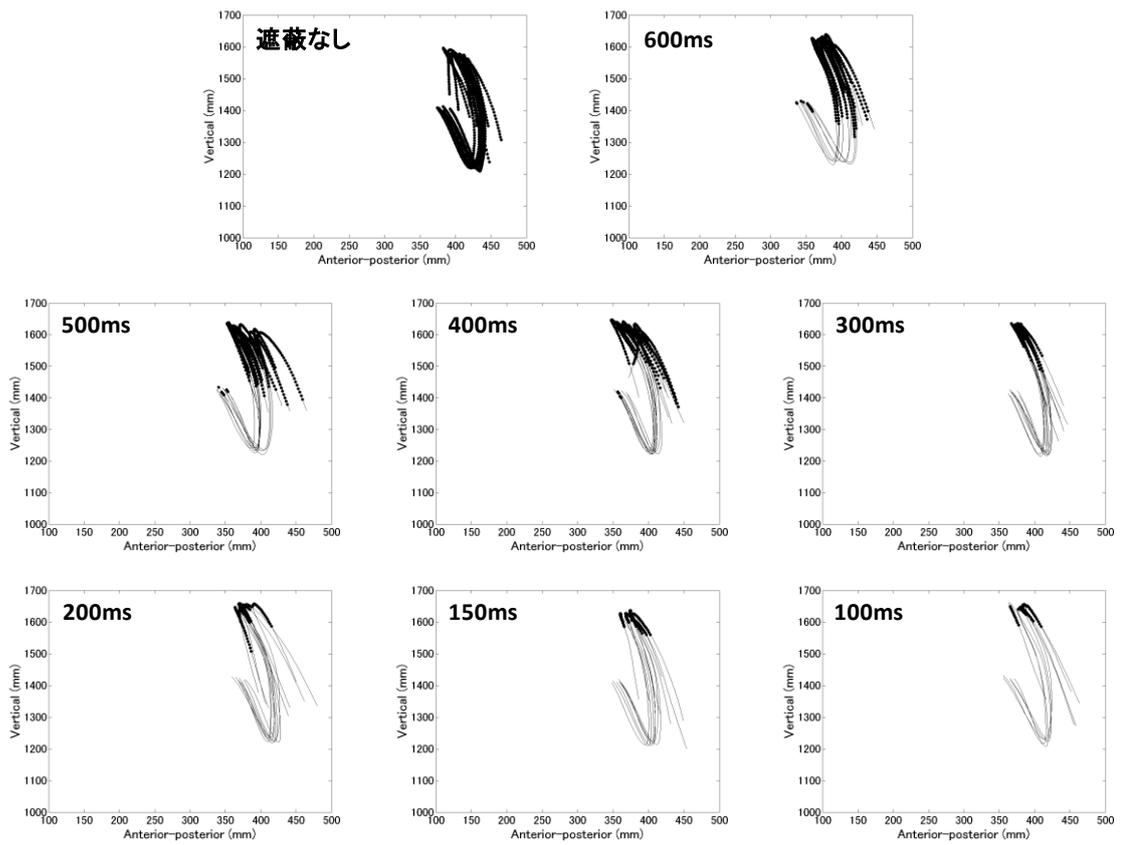


図 33 熟練者 B の post-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

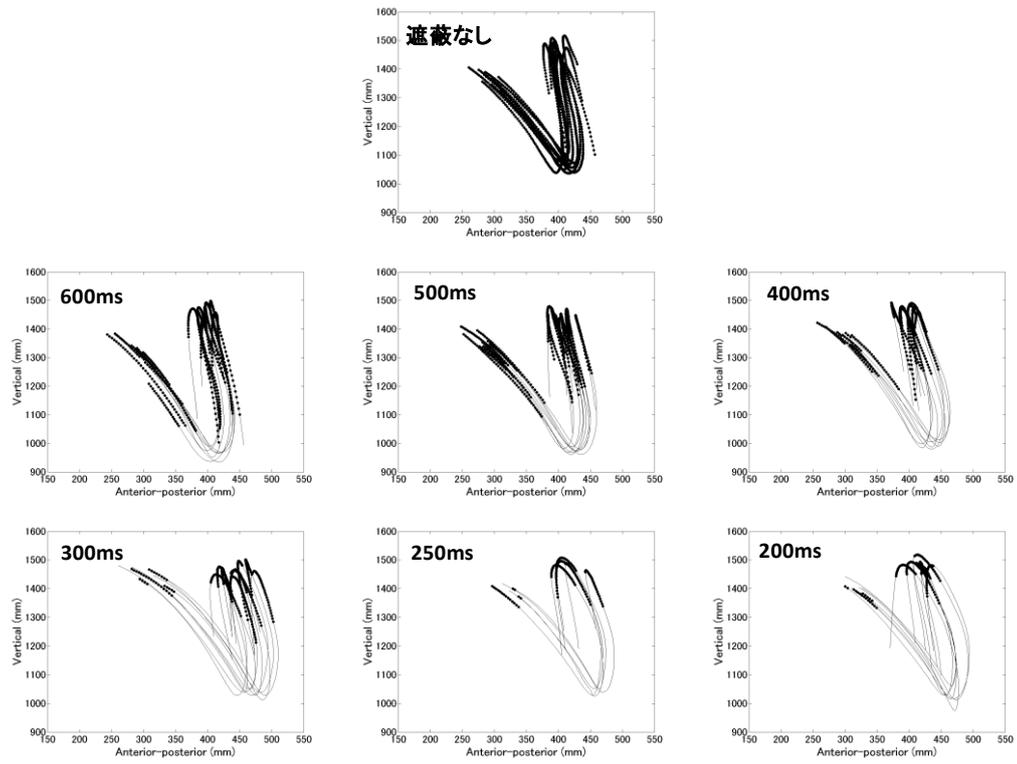


図 34 熟練者 C の pre-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

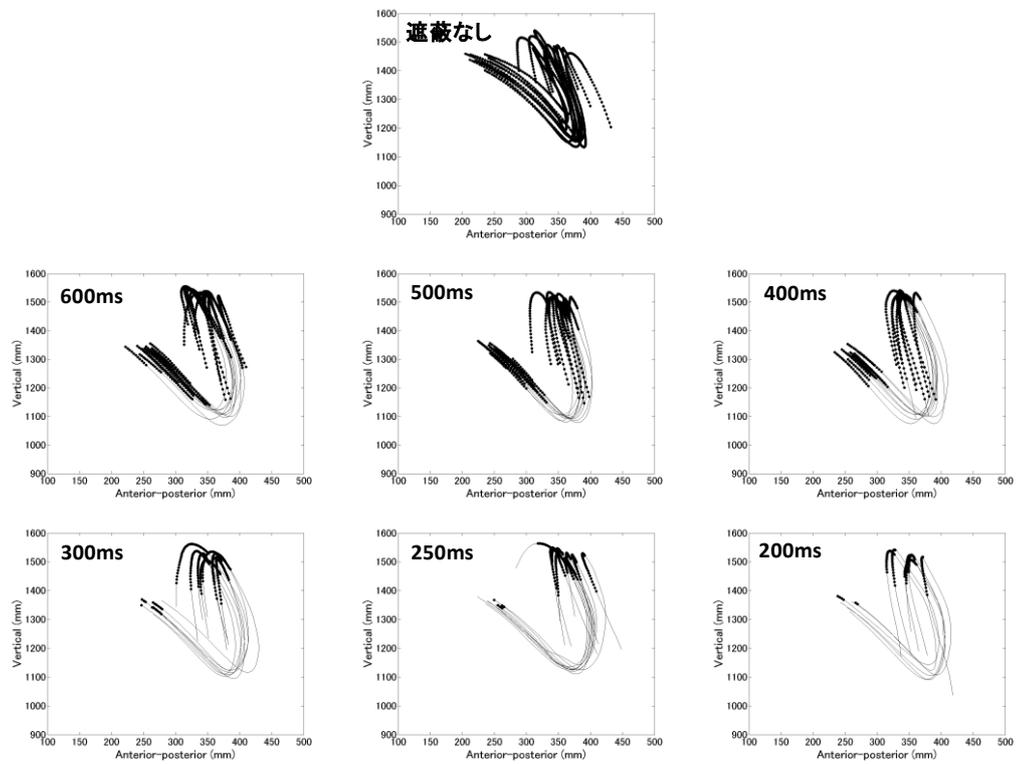


図 35 熟練者 C の post-test における頭部運動.図の見方は図 23 と同様.

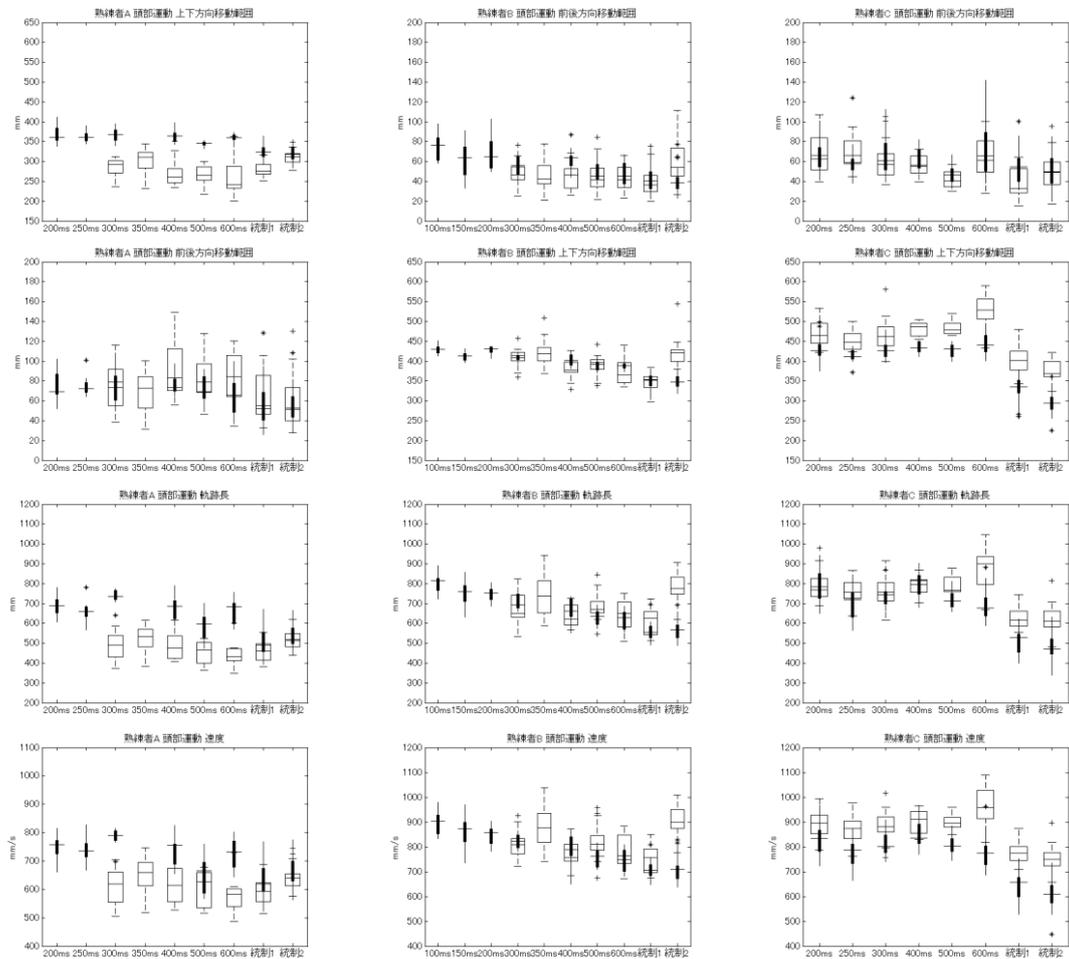


図 36 熟練者 A(左列), 熟練者 B(中列), 熟練者 C(右列)の頭部運動. 頭部運動の前後方向移動範囲(上段), 上下方向移動範囲(上中段), 軌跡長(下中段), 速度(下段). 白抜きの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

表 12 熟練者 A の頭部運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の下位検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者A			
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)
遮蔽	pre-test		統制1, 遮蔽ありの 350ms以外<統制2, 350ms 統制2>300ms>600ms	統制2, 350ms> 統制1, 400ms, 500ms, 600ms 統制2>統制1, 500ms, 600ms 350ms>統制1, 400ms, 500ms, 600ms
	post-test	遮蔽なし<遮蔽あり	遮蔽なし<遮蔽あり	遮蔽なし<遮蔽あり 200ms, 250ms>500ms 200ms>500ms, 600ms 250ms>500ms
学習	300ms	n.s.	pre<post	pre<post
	400ms		pre<post	pre<post
	500ms		pre<post	pre<post
	600ms		pre<post	pre<post

表 13 熟練者 B の頭部運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の単純主効果の検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者B				
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)	
遮蔽	pre-test	統制1, 遮蔽ありの 300ms以外<統制2	統制1<統制2, 遮蔽あり 統制2, 300ms, 350ms> 400ms, 500ms, 600ms	統制1<統制2, 300ms, 350ms, 500ms 統制2, 350ms>300ms, 400ms, 500ms, 600ms 300ms, 500ms>600ms 統制1<統制2, 300ms, 350ms, 500ms 統制2, 350ms>遮蔽あり の350ms以外 300ms, 500ms>600ms	
	post-test	統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの 600ms以外 100ms>150ms, 500ms, 600ms 200ms, 300ms>600ms	遮蔽なし<遮蔽あり 100ms>遮蔽ありの 200ms以外 200ms>400ms, 500ms, 600ms 150ms, 300ms>500ms, 600ms 400ms>600ms	統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの 600ms以外 100ms>遮蔽ありの 200ms以外 150ms, 200ms>400ms, 500ms, 600ms 300ms>500ms, 600ms 400ms>600ms	統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの 600ms以外 100ms>300ms, 400ms, 500ms, 600ms 150ms, 200ms>400ms, 500ms, 600ms 300ms>500ms, 600ms 400ms>600ms
学習	300ms	n.s.	n.s.	n.s.	
	400ms	pre<post	n.s.	n.s.	
	500ms	n.s.	n.s.	pre>post	pre>post
	600ms	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

表 14 熟練者 C の頭部運動(前後方向移動範囲, 上下方向移動範囲, 軌跡長, 速度)の下位検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者C				
	前後方向移動範囲(mm)	上下方向移動範囲(mm)	軌跡長(mm)	速度(mm/s)	
pre-test		遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2 200ms, 400ms, 500ms<600ms	遮蔽なし<遮蔽あり 遮蔽ありの600ms以外 <600ms 300ms<400ms	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2 遮蔽ありの600ms以外 <600ms	
遮蔽	統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの 500ms以外	250ms, 300ms<400ms, 500ms, 600ms			
post-test	200ms, 250ms>500ms	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2 200ms, 300ms<600ms 250ms<400ms, 500ms, 600ms	遮蔽なし<遮蔽あり 200ms>250ms	遮蔽なし<遮蔽あり 統制1>統制2	
学習	200ms	n.s.	pre>post	n.s.	pre>post
	250ms		pre>post	pre>post	pre>post
	300ms		pre>post	n.s.	pre>post
	400ms		pre>post	n.s.	pre>post
	500ms		pre>post	n.s.	pre>post
	600ms		pre>post	pre>post	pre>post

相互相関

玉の運動と頭部運動との関係に対する遮蔽と学習の効果を検討するため, 相互相関の絶対値が最大となる値を求めた(図 37). 算出した相互相関の値に対して各熟練者で遮蔽(遮蔽あり条件の各水準と遮蔽なし条件の 2 水準)と学習(pre-test/post-test)を要因とする分散分析を行った. また, 相互相関の絶対値が最大となるときのラグの値について検討した.

熟練者 A の最大相互相関とラグ. 前後方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 主効果, 交互作用ともに有意であった[遮蔽, 学習の主効果, 交互作用の順に, $F(7.05, 64.61)=11.03, p < .001, F(0.86, 10.28)=17.91, p < .001, F(7.62, 147.97)=2.51, p < .05$]. 単純主効果の結果, pre-test では, 統制 2 が 300ms の水準よりも最大相互相関が小さかった以外, 遮蔽なし条件のほうが遮蔽あり条件よりも最大相互相関が小さかった. post-test では, 統制 1 は遮蔽あり条件よりも, 統制 2 は 500ms, 600ms の水準よりも最大相互相関が小さかった. 学習の効果は, 400ms の水準においてのみ見られ, pre-test の

ほうが post-test よりも最大相互相関が大きかった(表 15). 上下方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 遮蔽と学習の交互作用のみ有意であった [$F(5.48, 66.22)=2.57, p<.05$]. 単純主効果の結果, 500ms の水準で学習の効果が見られ, post-test のほうが pre-test よりも最大相互相関が大きかった. その他の水準での学習の効果や遮蔽の効果では有意差がなかった(表 15).

次に, 熟練者 A の前後方向と上下方向の最大相互相関時のラグを検出した(図 38, 39). ラグの符号が正のとき, 玉の運動の時系列のほうが頭部運動の時系列よりも先行し, 頭部のほうが遅れていることを示している. pre-test では, どの水準でも 0.2~0.4 秒の区間で検出されることが多かった. 統制 2 では同区間での検出率が 56.7%であったものの, 統制 1 では 83.3%, 300ms では 75.0%, 350ms では 73.0%, 400ms では 90.0%, 500ms と 600ms では 100%検出されていた. post-test では, 全ての水準で-0.2~-0.1 秒の区間でのラグの検出率が高かった(統制 1 では 60.0%, 統制 2 では 63.3%, 200ms では 95%, 250ms と 300ms では 87.5%, 400ms では 70.0%, 500ms では 90.0%, 600ms では 80.0%). すべての水準で-0.2~-0.1 秒以外の区間でもラグが検出されたが, 統制 1,2 は-0.2~-0.1 秒以外のより複数の区間で, 割合は小さいもののラグが検出される傾向があった. 上下方向のラグは, pre-test も post-test も, -0.1~0 秒の区間ですべてのラグが検出された.

熟練者 A では, 上下方向の相互相関とラグにはほとんど変化はみられなかった. 変化は前後方向の相互相関に見られた. pre-test では遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件のほうが前後方向の最大相互相関は大きくなっていたが, post-test では統制 1 よりも遮蔽あり条件において最大相互相関が大きかったものの, 統制 2 に関しては遮蔽あり条件の一部の水準のみ, 統制 2 よりも最大相互相関が大きかった. ラグが多く検出される区間が pre-test と post-test で変化していた. ラグが多く検出される区間は遮蔽の有無によって違いはなかったが, post-test では, 遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも同一の区間で検出される傾向があった.

熟練者 B の最大相互相関とラグ. 熟練者 B の前後方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 主効果, 交互作用ともに有意であった[遮蔽, 学習の主効果, 交互作用の順に, $F(8.45, 85.58)=5.94, p <.001, F(0.91, 11.60)=197.28, p <.001, F(7.13, 102.20)=8.46, p <.001$]. 単純主効果の結果は表 16 に示した. 分析結果をまとめると, pre-test では, 統制 2 は遮蔽あり条件と統制 1 よりも小さかった. post-test では, 遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも, 100ms のほうが 500ms と 600ms よりも最大相互相関の値が小さかった. 両 test で実施したすべての水準に学習の効果があり, post-test のほうが pre-test よりも最大相互相関が小さかった. 上下方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 主効果, 交互作用ともに有意であった[遮蔽, 学習の主効果, 交互作用の順に, $F(8.24, 52.00)=11.35, p <.001, F(0.81, 18.46)=15.83, p <.05, F(7.72, 52.00)=5.84, p <.001$]. 単純主効果の結果は表 16 に示した. 分析結果をまとめると, pre-test では, 統制 1 が遮蔽あり条件の 300ms と有意差が認められなかった以外, 遮蔽なし条件のほうが遮蔽あり条件よりも最大相互相関が小さかった. 統制 1 は統制 2 よりも, 350ms は 400ms と 600ms の水準よりも最大相互相関が小さかった. post-test では, 統制 2 と 100ms の水準は 400ms と 500ms の水準よりも, 150ms は統制 1, 400ms, 500ms, 600ms の水準よりも最大相互相関が小さかった. 学習の効果はみられなかった.

次に, 熟練者 B の前後方向と上下方向の最大相互相関時のラグを検出した(図 40, 41). 前後方向のラグは, pre-test ではどの水準も -0.2~0 秒の区間で検出されることが多かった(統制 1 では 80.8%, 統制 2 では 60.0%, 300ms では 90.0%, 350ms では 85.1%, 400ms では 66.6%, 500ms では 78.1%, 600ms では 71.4%). 次いで, 0.2~0.4 秒の区間で検出されていた(統制 1 では 19.2%, 統制 2 では 40.0%, 300ms では 10.0%, 350ms では 11.1%, 400ms では 33.3%, 500ms では 21.9%, 600ms では 19.2%). post-test でも, どの水準も -0.2~0 秒の区間と 0.2~0.4 秒の区間での検出率が高かった(-0.2~0 秒の区間では, 統制 1 では 58.6%, 統制 2 では 79.3%, 100ms では 47.0%, 150ms では 65.5%, 200ms では

12.5%, 300msでは22.2%, 400msでは30.0%, 500msでは70.0%, 600msでは87.5%. 0.2~0.4秒の区間では, 統制1では41.3%, 統制2では20.7%, 100msでは23.5%, 150msでは20.6%, 200msでは62.5%, 300msでは66.7%, 400msでは60.0%, 500msでは30.0%, 600msでは12.5%). しかし, 遮蔽あり条件の500msと600ms以外の水準では, 0.6~0.7秒の区間でも検出されていた(100msでは23.5%, 150msでは10.3%, 200msでは25.0%, 300msでは11.1%, 400msでは10.0%). 100msの水準では, 1試行のみだが, 1~1.1秒の区間でもラグが検出された(5.9%). 上下方向のラグは, 熟練者Aと同様に, pre-testもpost-testも, -0.1~0秒の区間ですべてのラグが検出された.

熟練者Bでは, 前後方向の最大相互相関とラグについて, post-testで遮蔽の有無による差がみられた. post-testでは遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が小さくなり, ラグは, シャッターの開いている時間が短い水準でより複数の区間で検出されていた. 上下方向の最大相互相関は, pre-testでは遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも値が大きくなっていましたが, post-testでは, 遮蔽の有無による差があるとは言えなかった. むしろ, シャッターの開閉の短い水準でシャッターの開いている時間がより長い水準よりも最大相互相関の値が小さくなる傾向があると考えられた. 上下方向のラグはpre-testもpost-testもすべて, 遮蔽の有無に関わらず, -0.1~0秒の区間で検出された.

熟練者Cの最大相互相関とラグ. 熟練者Cの前後方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 遮蔽と学習の主効果が有意であった[遮蔽, 学習の主効果の順に, $F(5.24, 182.43)=3.32, p<.01, F(0.75, 16.49)=15.72, p<.01$]. 多重比較の結果は表17に示した. 分析結果をまとめると, 遮蔽の効果については, 統制1は300ms, 400ms, 500msよりも, 統制2は300ms, 500msよりも, 200msは500msよりも最大相互相関が小さかった. 学習の効果は, pre-testのほうがpost-testよりも最大相互相関が大きかった. 上下方向の最大相互相関の値に対する分散分析の結果, 主効果, 交互作用ともに有意であった[遮蔽,

学習の主効果, 交互作用の順に, $F(6.57, 110.21)=40.67, p<.001, F(0.78, 18.06)=19.21, p<.01, F(5.88, 138.52)=4.21, p<.01$]. 単純主効果の結果は表 17 に示した. 遮蔽の効果は, pre-test では, 統制 1 が遮蔽あり条件の 300ms と有意差が認められなかった以外, 遮蔽なし条件のほうが遮蔽あり条件よりも最大相互相関が小さかった. また, 250ms は 600ms よりも最大相互相関が小さかった. post-test では, 遮蔽なし条件のほうが遮蔽あり条件よりも, 200ms のほうが 600ms よりも最大相互相関が小さかった. 学習の効果は 250ms, 300ms, 400ms, 500ms の水準でみられ, pre-test よりも post-test において最大相互相関が大きくなっていった.

次に, 熟練者 C の前後方向と上下方向の最大相互相関時のラグを検出した(図 42, 43). 前後方向は, pre-test では, 遮蔽あり条件では-0.3~-0.1 秒の区間でのラグの検出率が高かった(200ms では 80%, 250ms では 84.2%, 300ms では 96.9%, 400ms と 500ms では 100%, 600ms では 65.2%). 遮蔽なし条件では, -0.2~0 秒の区間での検出率が高かった(統制 1 は 80.0%, 統制 2 は 89.3%). post-test では, すべての水準で-0.2~0 秒でのラグの検出率が高かった(統制 1, 2 では 80.0%, 200ms では 91.7%, 250ms と 500ms では 100%, 300ms では 92.9%, 400ms では 88.9%, 600ms では 86.6%). 上下方向のラグは, pre-test も post-test も, 遮蔽あり条件では-0.1~0 秒の区間でのみ検出された. 遮蔽なし条件でも同一の区間で検出されることが多かったが(pre-test の統制 1 は 88.9%, 統制 2 は 89.3%, post-test の統制 1 は 53.3%, 統制 2 は 70.0%), 0~0.1 秒の区間でも検出された. その他の区間でラグが検出されることはなかった.

熟練者 C では, 前後方向の最大相互相関について, 両 test ともに, 遮蔽あり条件の一部の水準が遮蔽なし条件よりも大きかったが, 上下方向では, 遮蔽あり条件のすべての水準が遮蔽なし条件よりも玉と頭部との最大相互相関が大きい傾向があった. 上下方向については, pre-test も post-test も, 遮蔽なし条件では-0.1~0 秒の区間と 0~0.1 秒の区間の区間で検出されたのに対し, 遮蔽あり条件では, ラグが-0.1~0 秒の区間でのみ検出

された。

以上、CCFの結果を要約する。前後方向の最大相互相関、ラグについて遮蔽の有無で顕著な変化がみられたのは熟練者Bであった。熟練者Bでは、pre-testでは遮蔽の有無による差があるとは言えなかったが、post-testでは遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が小さくなっていた。また、ラグが検出される区間についても、遮蔽あり条件の特にシャッターの開いている時間が短い水準において、ラグがより複数の区間で検出される傾向があった。このことは、熟練者Bでは、遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件で、前後方向の頭部の運動は玉の運動とカップリングしていなかったことを示す。熟練者Aと熟練者Cでは、練習を経て、熟練者Bとは異なり、遮蔽あり条件の水準によっては、遮蔽なし条件よりも最大相互相関の値が大きくなる傾向があると考えられた。

上下方向のCCFの結果は、熟練者Aでは遮蔽と学習の効果は最大相互相関の値にはほとんどみられず、熟練者Bではpre-testでは遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が大きくなっていたが、post-testでは、遮蔽の有無による差があるとは言えなかった。熟練者Cは、pre-testでは一部の水準を除き、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が大きくなっており、post-testでは遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が大きくなっていた。上下方向のラグは、すべての熟練者で、遮蔽の水準によらず、両testともに、-0.1~0秒の区間で検出されることがほとんどであった。熟練者Aと熟練者Bは、すべての試行のラグが-0.1~0秒の区間で検出され、熟練者Cの遮蔽なし条件の一部の試行で、0~0.1秒の区間でも検出された。上下方向の玉の運動と頭部の運動のカップリングについては、遮蔽なし条件と同様に頑強なカップリングが維持されるか、あるいはよりカップリングが強くなっていた。

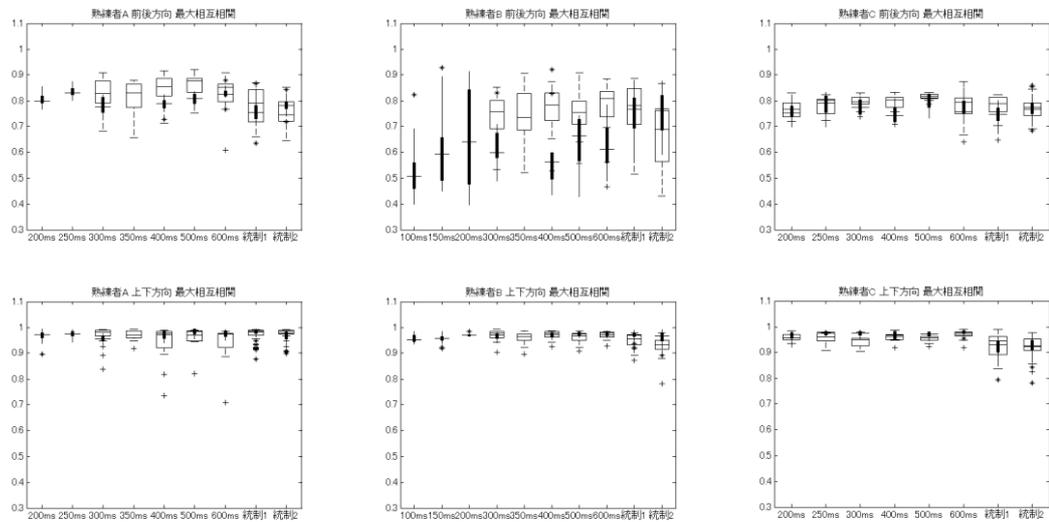


図 37 熟練者 A(左列), 熟練者 B(中列), 熟練者 C(右列)の最大相互相関. 上段が前後方向, 下段が上下方向の最大相互相関. 白抜きの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

表 15 熟練者 A の前後方向と上下方向の CCF(相互相関)の下位検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者A	
	前後方向CCF	上下方向CCF
遮蔽	pre-test 統制1<遮蔽あり 統制2<遮蔽ありの300ms以外	n.s.□
	post-test 統制1<遮蔽あり 統制2<500ms, 600ms	n.s.□
学習	300ms	n.s.
	400ms	pre>post
	500ms	n.s.
	600ms	pre<post
		n.s.

表 16 熟練者 B の前後方向と上下方向の CCF(相互相関)の単純主効果の検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者B		
	前後方向CCF	上下方向CCF	
遮蔽	pre-test	統制2<遮蔽あり, 統制1	統制1<遮蔽ありの300ms以外 統制2<遮蔽あり 統制1>統制2 350ms<400ms, 600ms
	post-test	遮蔽なし>遮蔽あり 100ms< 500ms, 600ms	統制2, 100ms<400ms, 500ms 150ms<統制1, 400ms, 500ms, 600ms
学習	300ms	pre>post	n.s.
	400ms	pre>post	n.s.
	500ms	pre>post	n.s.
	600ms	pre>post	n.s.

表 17 熟練者 C の前後方向と上下方向の CCF(相互相関)の下位検定の結果. 5%水準で有意の項目のみ記載. 表の見方は表 9 と同様.

要因	熟練者C	
	前後方向CCF	上下方向CCF
遮蔽	pre-test	遮蔽1<遮蔽ありの300ms以外 遮蔽2<遮蔽あり 300ms<遮蔽ありの300ms以外
	post-test	遮蔽なし<遮蔽あり 200ms<600ms
学習	200ms	n.s.
	250ms	pre<post
	300ms	pre<post
	400ms	pre<post
	500ms	pre<post
	600ms	n.s.

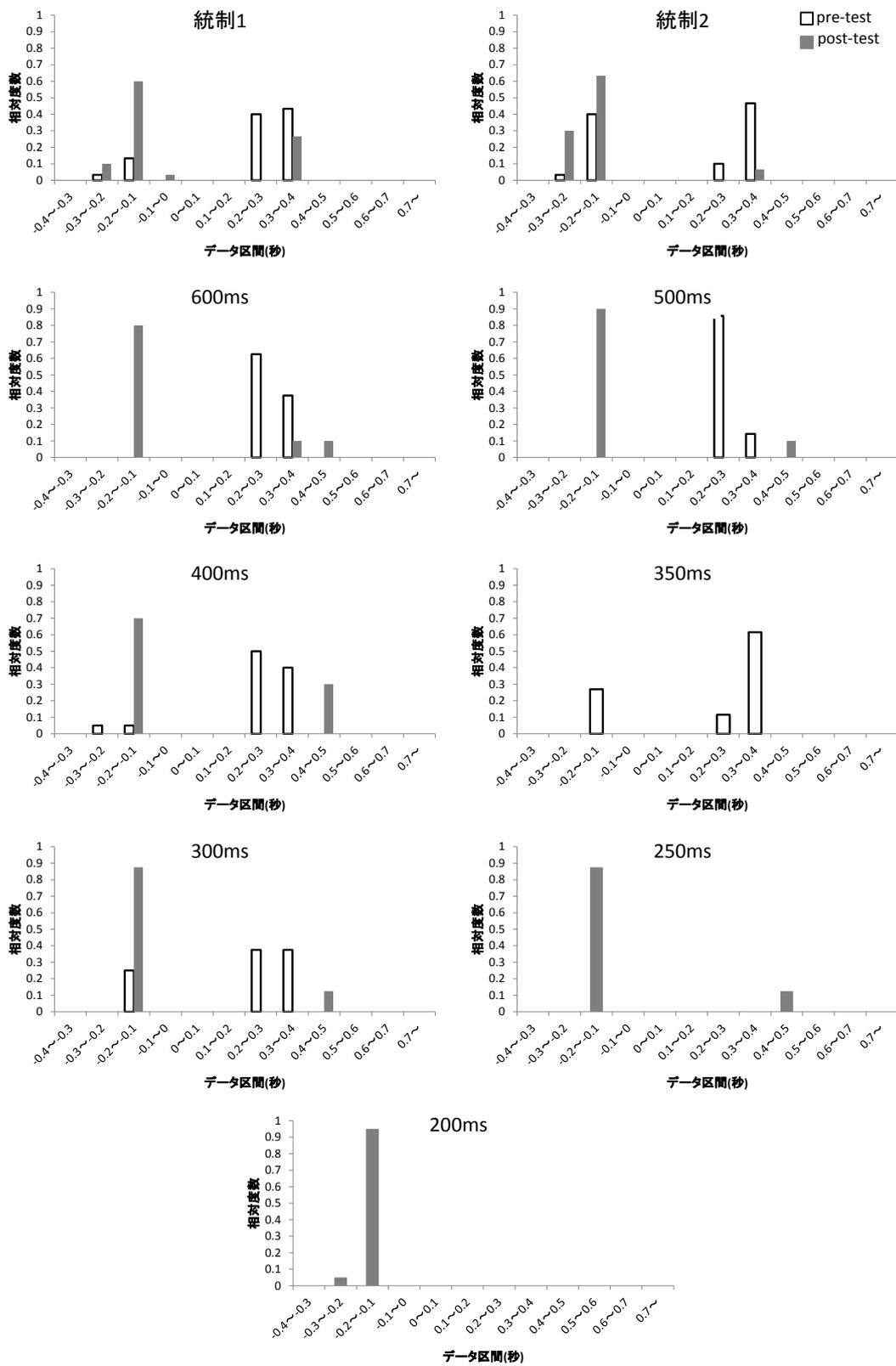


図 38 熟練者 A の前後方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数。

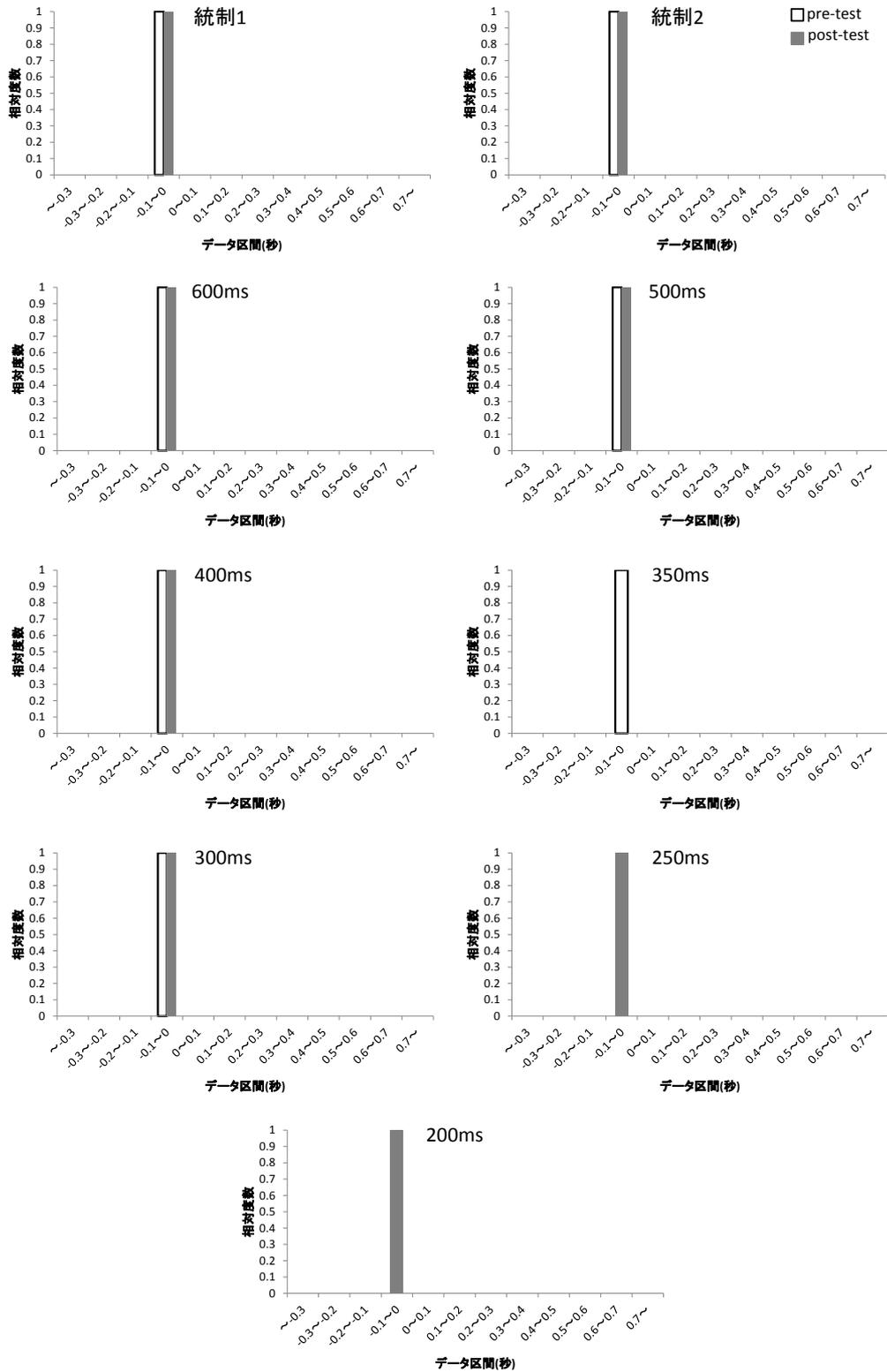


図 39 熟練者 A の上下方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数.

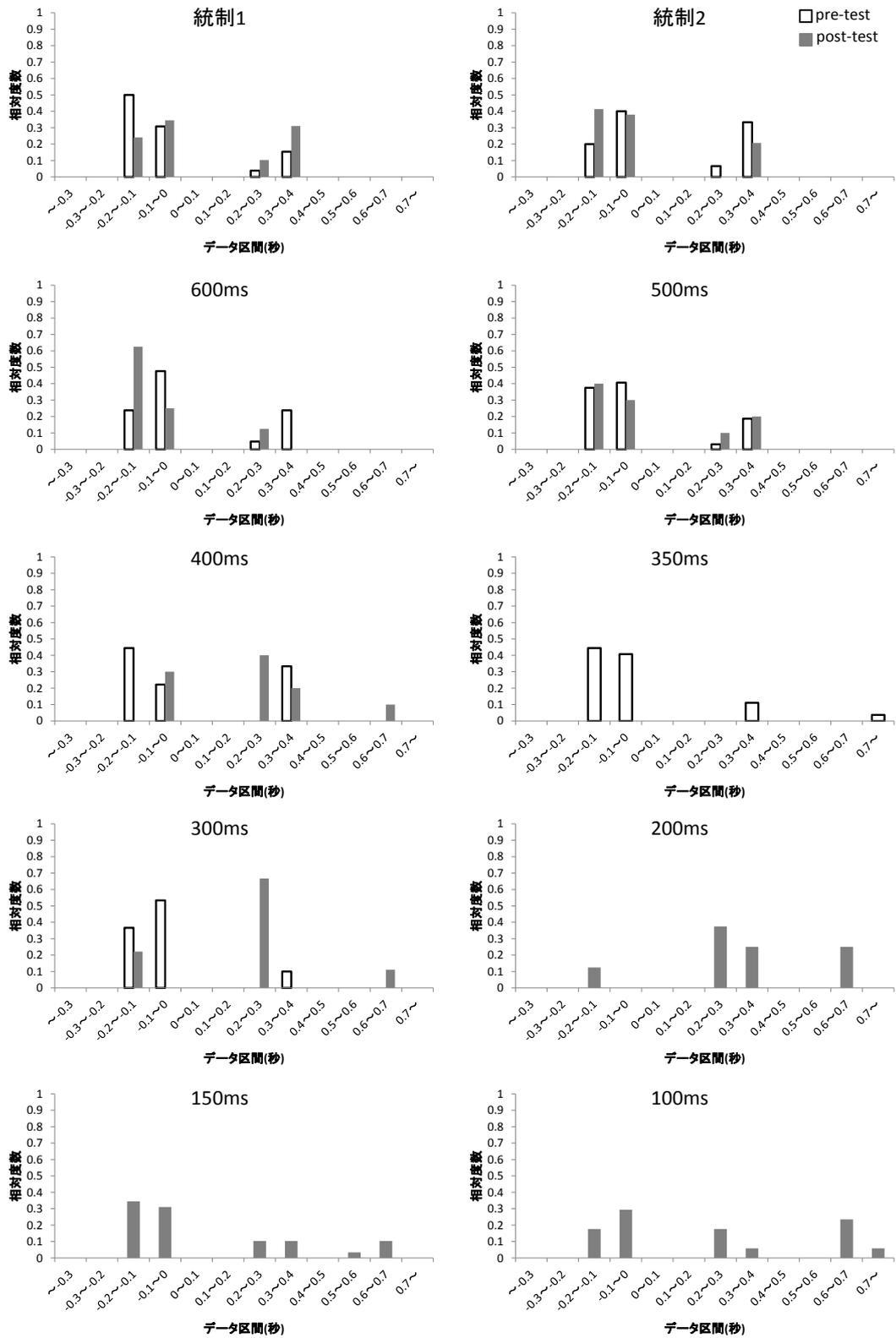


図 40 熟練者 B の前後方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数.

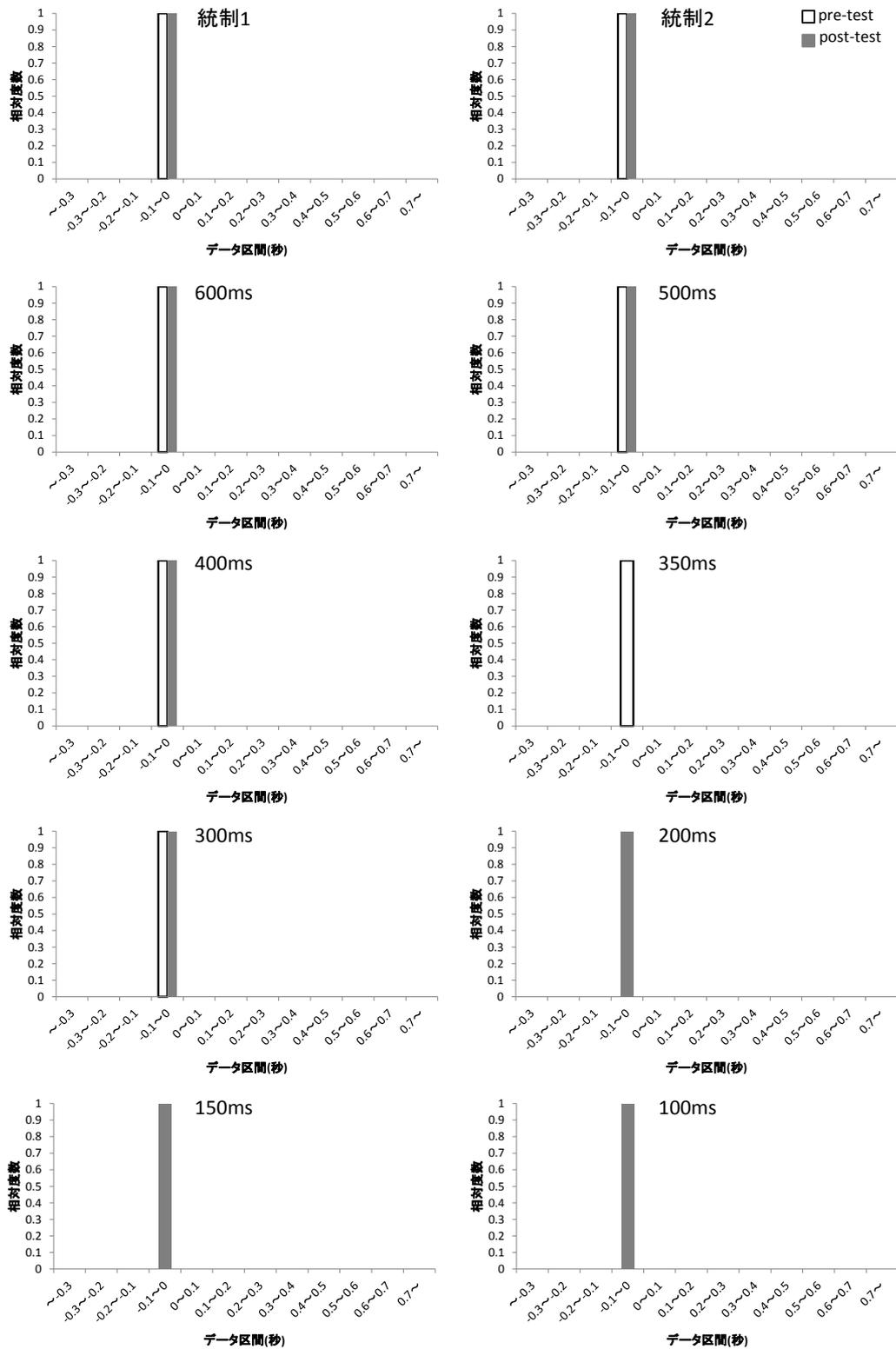


図 41 熟練者 B の上下方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数.

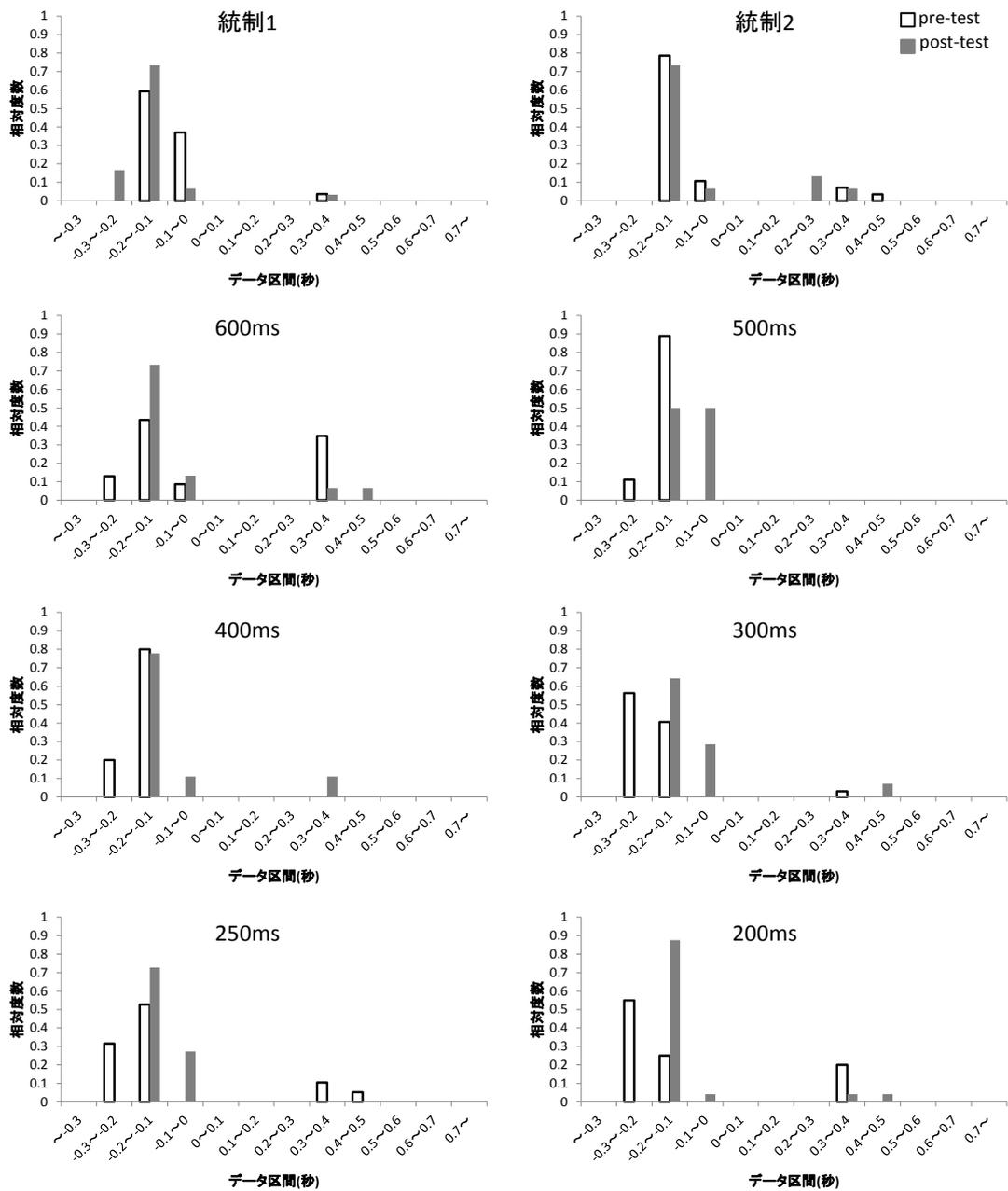


図 42 熟練者 C の前後方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数。

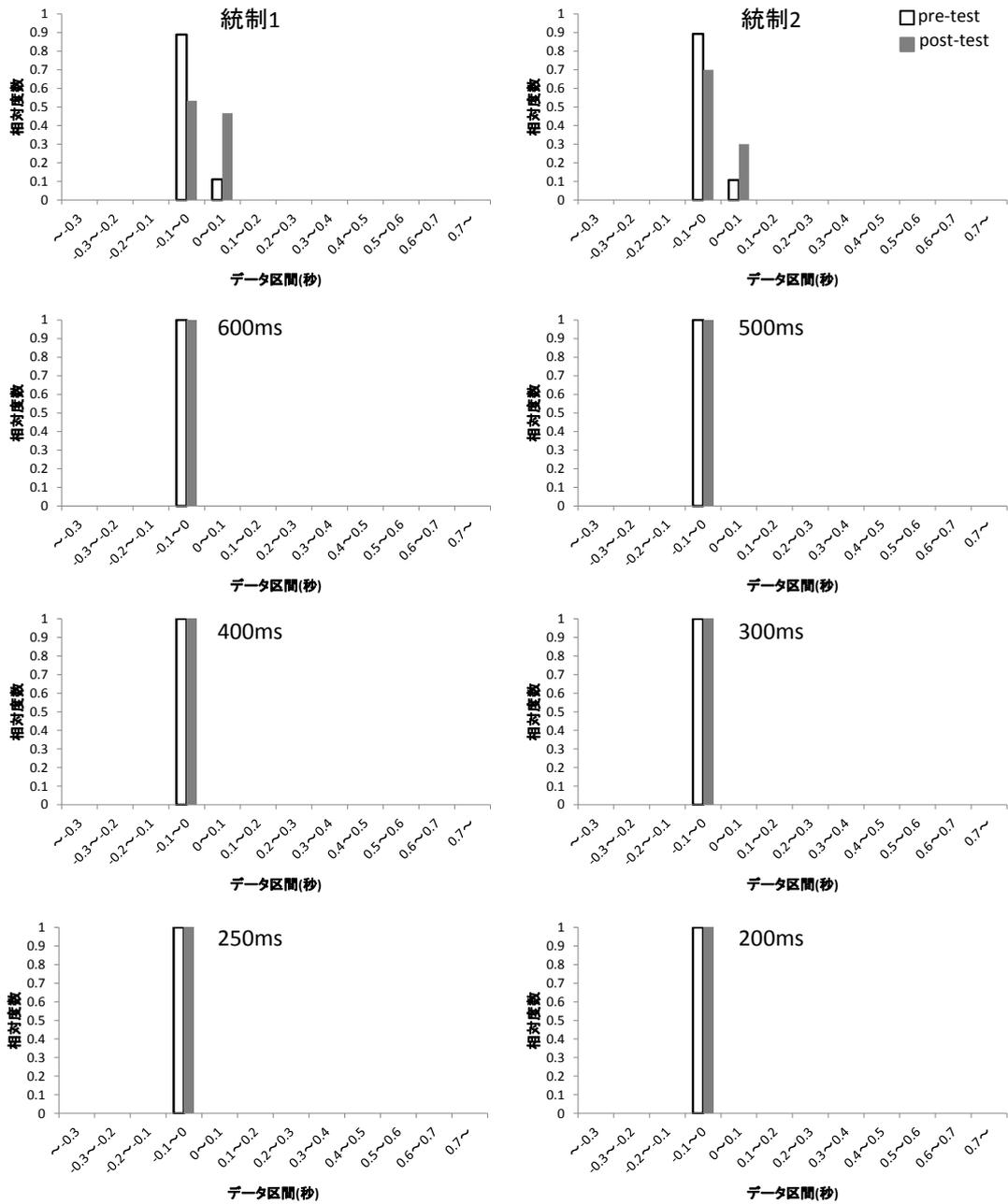


図 43 熟練者 C の上下方向における玉の運動と頭部運動との最大相互相関のラグの相対度数。

玉の相対速度

頭部中心座標系の玉の相対速度を各試行で算出し、ふりけんでけん先を玉に入れるときに、頭部の運動によって観察点を動かすことで、視覚情報を得やすくしていたのかどうかについて検討した。図 44 は、熟練者 A の post-test における遮蔽なし条件と、シャッターが 400ms 開いていた水準のあるセットにおける玉の相対速度を示している。図 30 で、速度が最大値をとるときが玉を返すところで、速度が試行の途中で極小値をとるところが玉の軌道の頂点付近に相当する。図のように、玉の軌道の頂点付近では、条件に関わらず玉の相対速度の変化率が小さくなっていた。遮蔽あり条件では、速度変化率が小さくなるときにシャッターが開いており、さらに、速度変化率の小さい領域が遮蔽なし条件と比較して長くなっているようであった。速度変化率を小さくする時間を長くして、けんを玉に入れるときに利用する視覚情報を得やすくしているのではないかと考えられたため、その継続時間(範囲)を算出した¹⁰(図 45)。そして熟練者 A、熟練者 B、熟練者 C の速度変化率を小さくする時間幅について、遮蔽と学習の影響があるかを検討するため、遮蔽(遮蔽あり条件の各水準と遮蔽なし条件の 2 水準)と学習(pre-test/post-test)を要因とする分散分析を行った。

熟練者 A は遮蔽と学習の主効果、交互作用が有意であった[それぞれ、 $F(7.30, 59.26)=5.89, p<.001, F(0.92, 12.71)=189.46, p<.001, F(5.25, 142.14)=6.83, p<.001$].

¹⁰ 速度変化率を小さくする範囲は、その開始点と終了点を次のように算出した。まず減速の開始点については、玉の相対速度の時系列において、玉を返して以降(玉の相対速度が最大値をとって以降)の時系列を用いて、最初は 10 ポイントのデータを用いて回帰直線をあてはめ、決定係数を求める。回帰の当てはめに使う時系列を 1 ポイントずつ増やして決定係数を求めていき、減速が開始されると回帰への当てはめが悪くなり、決定係数が小さくなる。本論文では、決定係数が 0.980 よりも小さくなった点を減速の開始とした。減速の終了点は、減速の開始とみなしたデータの速度変化率の絶対値が約 0.2 であったことから、その数値を基準として、速度変化率が増加していき、かつ 0.2 より大きくなったポイントを減速終了点とした。減速終了後から試行終了までの時系列を用いて直線の当てはめをして減速終了点を求める方法は、回帰の当てはめをするには時系列が短い場合が多いため行わなかった。

単純主効果の検定の結果, pre-test では, 遮蔽の水準による有意差はなかった. Post-test では, 遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件のほうが速度変化率を小さくしている時間が有意に長かった($p < .05$). 両 test とともに実施した遮蔽あり条件の各水準では, pre-test よりも post-test のほうが減速の範囲が長かった($p < .001$). 熟練者 B も遮蔽と学習の主効果, 交互作用が有意であった[それぞれ, $F(7.49, 25.49)=14.14, p < .001, F(0.85, 7.08)=40.42, p < .001, F(6.60, 140.61)=3.62, p < .05$]. 単純主効果の検定の結果, pre-test では, 統制 2 と遮蔽あり条件の 600ms 以外の水準は統制 1 よりも減速の範囲が長かった($p < .05$). Post-test では, 遮蔽あり条件の各水準のほうが遮蔽なし条件よりも減速の範囲が長く, 100ms は 400ms, 500ms, 600ms よりも, 150ms は 500ms と 600ms よりも, 200ms は 600ms よりも減速の範囲が長かった($p < .05$). 両 test とともに実施した遮蔽あり条件の各水準では, 500ms の水準のみ pre-test のほうが post-test よりも減速の範囲が長かった($p < .05$). 熟練者 C では遮蔽と学習の主効果が有意であった[それぞれ, $F(6.82, 116.07)=19.01, p < .001, F(0.93, 21.87)=34.70, p < .001$]. 多重比較の結果, 遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件のほうが減速の時間が長かった($p < .001$). Pre-test のほうが post-test よりも速度変化率を小さくする時間が長かった($p < .001$).

以上より, すべての熟練者が, post-test では, 遮蔽なし条件より遮蔽あり条件のほうが速度変化率を小さくする時間が長かった. 熟練者 B では, post-test の遮蔽あり条件において, シャッターの開いている時間が短い水準のほうが速度変化率を小さくする持続時間が長い傾向にあった.

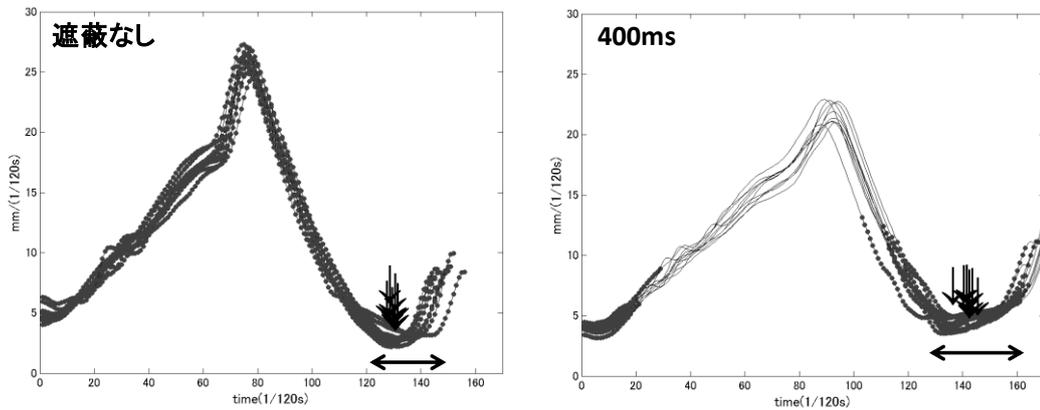


図 44 熟練者 A の post-test における遮蔽なし条件の代表的なセット(左)とシャッターが 400ms 開いていた水準(右)の頭部中心座標系の玉の相対速度の時系列変化。図中の両矢印が等速化の範囲を，ドットでプロットされた部分はシャッターが開いていたタイミングを，下矢印は玉が頂点に到達したタイミングを示す。

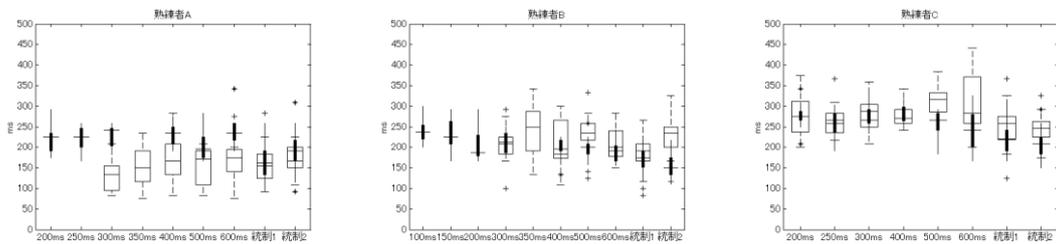


図 45 熟練者 A(左), 熟練者 B(中), 熟練者 C(右)における玉の相対速度の速度変化を小さくしていた範囲(ms). 白抜ききの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を，黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す。

タウカップリング

ふりけんで利用されると考えられる視覚情報について、タウカップリングによって検討した。

タウカップリングが検出された区間の有無.

解析可能な試行のうち、 $\tau_a \times \tau_d$ のプロットと $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のプロットで直線回帰の決定係数が95%を超える区間のある試行の割合を調べた。熟練者Aのpre-testでは、 $\tau_a \times \tau_d$ のプロットで70.37%(解析可能試行135試行, タウカップリングしていた試行95試行), $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のプロットで77.37%(解析可能試行135試行, タウカップリングしていた試行104試行)であった。熟練者Aのpost-testでは $\tau_a \times \tau_d$ のプロットで68.25%(解析可能試行126試行, タウカップリングしていた試行86試行), $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のプロットで86.51%(解析可能試行126試行, タウカップリングしていた試行109試行)。カイ二乗検定の結果, 熟練者Aのpost-testのみ, $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のほうがタウカップリングしていたとみなされた試行数が多かった [$\chi^2(1) = 11.99, p < .001$]. また, 熟練者Aのカップリング持続時間(タウカップリングしているとみなされた区間)の平均は, pre-testでは0.192秒で, post-testでは0.243秒であった。

熟練者Bのpre-testでは, $\tau_a \times \tau_d$ のプロットで27.60%(解析可能試行163試行, タウカップリングしていた試行45試行), $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のプロットで76.07%(解析可能試行163試行, タウカップリングしていた試行124試行)であった。熟練者Bのpost-testでは $\tau_a \times \tau_d$ のプロットで52.70%(解析可能試行148試行, タウカップリングしていた試行78試行), $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のプロットで89.19%(解析可能試行148試行, タウカップリングしていた試行132試行)(図46)。カイ二乗検定の結果, 熟練者Bのはpre-testもpost-testも, $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のほうがタウカップリングしていたとみなされた試行数が多いと言えた[それぞれ $\chi^2(1) = 76.68, p < .001$; $\chi^2(1) = 47.79, p < .001$]. したがって, 熟練者Aのpre-test以外は, 頭部運動を考慮した $\tau_a \times \tau_{d(local)}$ のほうが, タウカップリングしていたとみなされる試行

数の割合が高かった。また、熟練者 B のカップリングの持続時間は、pre-test では 0.207 秒で、post-test では 0.253 秒であった。

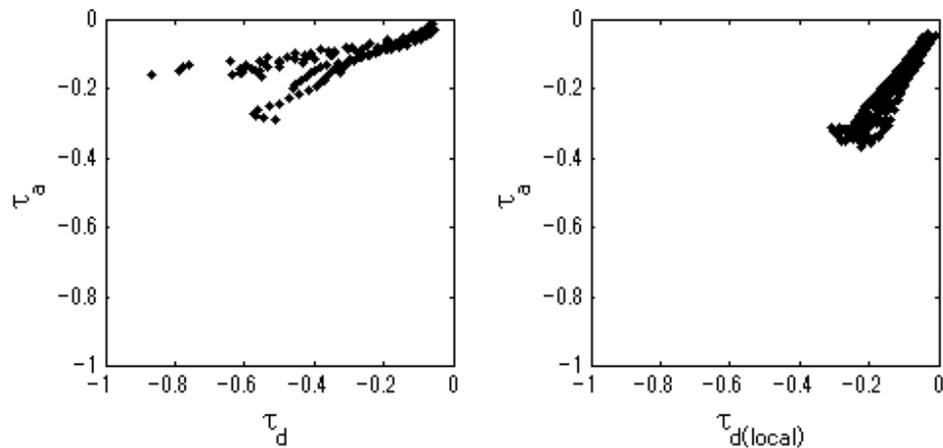


図 46 熟練者 B の post-test の 500ms における $\tau_d \times \tau_a$ (左) と $\tau_a \times \tau_{d(\text{local})}$ (右) のタウプロット。

k の値.

タウカップリングしていたとみなされた試行数は、熟練者 A の pre-test では $\tau_a \times \tau_d$ と $\tau_a \times \tau_{d(\text{local})}$ で異なるとは言えなかったが、熟練者 A の post-test と熟練者 B の両 test では有意差が認められたため、 k の値の分析は、 $\tau_a \times \tau_{d(\text{local})}$ のみに対して行った。熟練者 A と熟練者 B のそれぞれの k の値に対して、遮蔽と学習を要因とする分散分析を行った。その結果、熟練者 A では遮蔽、学習の主効果とそれらの交互作用が有意であった[それぞれ、 $F(2.30, 55.04) = 5.63, p < .05$; $F(0.89, 7.04) = 90.91, p < .001$; $F(5.64, 48.57) = 5.15, p < .01$]。熟練者 A の k の値は、pre-test では遮蔽の効果が認められなかった。単純主効果の結果、post-test では、遮蔽の効果が有意であり [$F(5.22, 52.38) = 6.77, p < .01$]、遮蔽なし条件の k の値は 400ms, 500ms, 600ms における k の値よりも小さく、200ms の k の値は 500ms のそれよりも小さかった ($p < .05$)。また、両 test で実施したすべての水準で、post-test の k の値のほうが pre-test の値よりも大きくなっていった。熟練者 B では学習の

主効果のみ有意であった [$F(0.90, 12.36) = 66.39, p < .001$]. 熟練者 B の k の値は, pre-test のほうが post-test よりも小さかった(図 47).

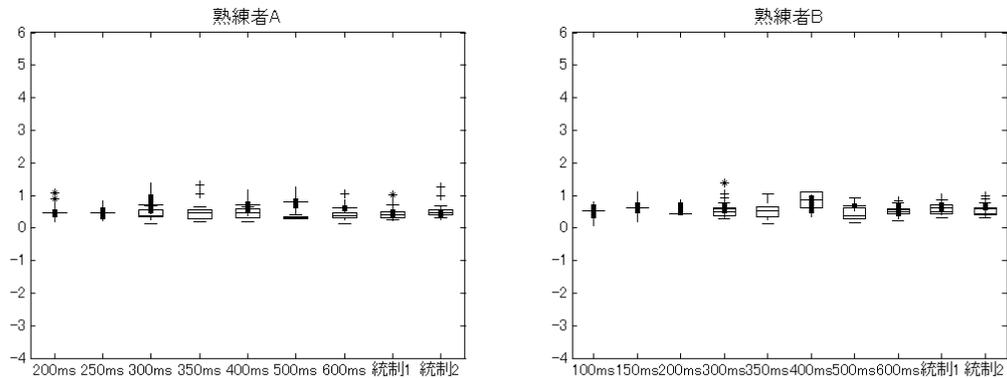


図 47 熟練者 A と熟練者 B の k の値. 白抜きの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

$k(t)$:各区間 t での k の値

$\tau_a \times \tau_d(\text{local})$ の時系列を 0.30 秒から 0.05 秒のあいだの 6 つの区間において $k(t)$ を算出した(図 47, 48). 算出された $k(t)$ の値に対して遮蔽と学習と区間を要因とする分散分析を行った. その結果, 熟練者 A では遮蔽, 学習, 区間の主効果と遮蔽 \times 学習, 遮蔽 \times 区間, 学習 \times 区間の交互作用が有意であった[それぞれ順に, $F(3.10, 77.49) = 6.93, p < .001$; $F(0.83, 20.39) = 114.36, p < .001$; $F(4.52, 22.26) = 93.30, p < .001$; $F(6.78, 31.89) = 7.05, p < .001$; $F(33.59, 72.50) = 2.619, p < .001$; $F(1.72, 15.92) = 9.22, p < .01$]. 各区間における遮蔽の効果は, けんと玉との接触前 0.25 秒と 0.05 の区間で有意であった [$F(4.03, 14.17) = 6.79, p < .01$; $F(1.25, 87.64) = 4.44, p < .05$]. 0.25 秒前の区間では, 遮蔽なし条件と 200ms における $k(t)$ は 400ms, 500ms, 600ms における $k(t)$ よりも, 統制 1 は統制 2 と 350ms よりも, 200ms は 350ms よりも, 250ms は 400ms, 600ms よりも $k(t)$ の値が小さかった. 0.05 秒前の区間では, 遮蔽なし条件の $k(t)$ は 200ms よりも, 統制 2 の $k(t)$ は 300ms よりも値が大きかった. 遮蔽の各水準で区間の効果があるかを調べたところ表 18 のようになった.

熟練者 B では遮蔽, 学習, 区間の主効果と, 遮蔽×区間, 学習×区間の交互作用が有意であった[それぞれ順に, $F(8.74, 59.20) = 2.22, p < .05$; $F(0.54, 10.45) = 22.81, p < .01$; $F(4.35, 106.83) = 56.01, p < .001$; $F(13.09, 891.05) = 3.38, p < .001$; $F(1.31, 116.34) = 6.02, p < .01$]. 各区間における遮蔽の効果は, けんと玉との接触前 0.30 秒の区間のみ有意であり [$F(6.42, 196.64) = 5.50, p < .01$], 統制 1 が 600ms 以外の区間より $k(t)$ の値が小さかった. 遮蔽の各水準で区間の効果があるかを調べたところ表 19 のようになった.

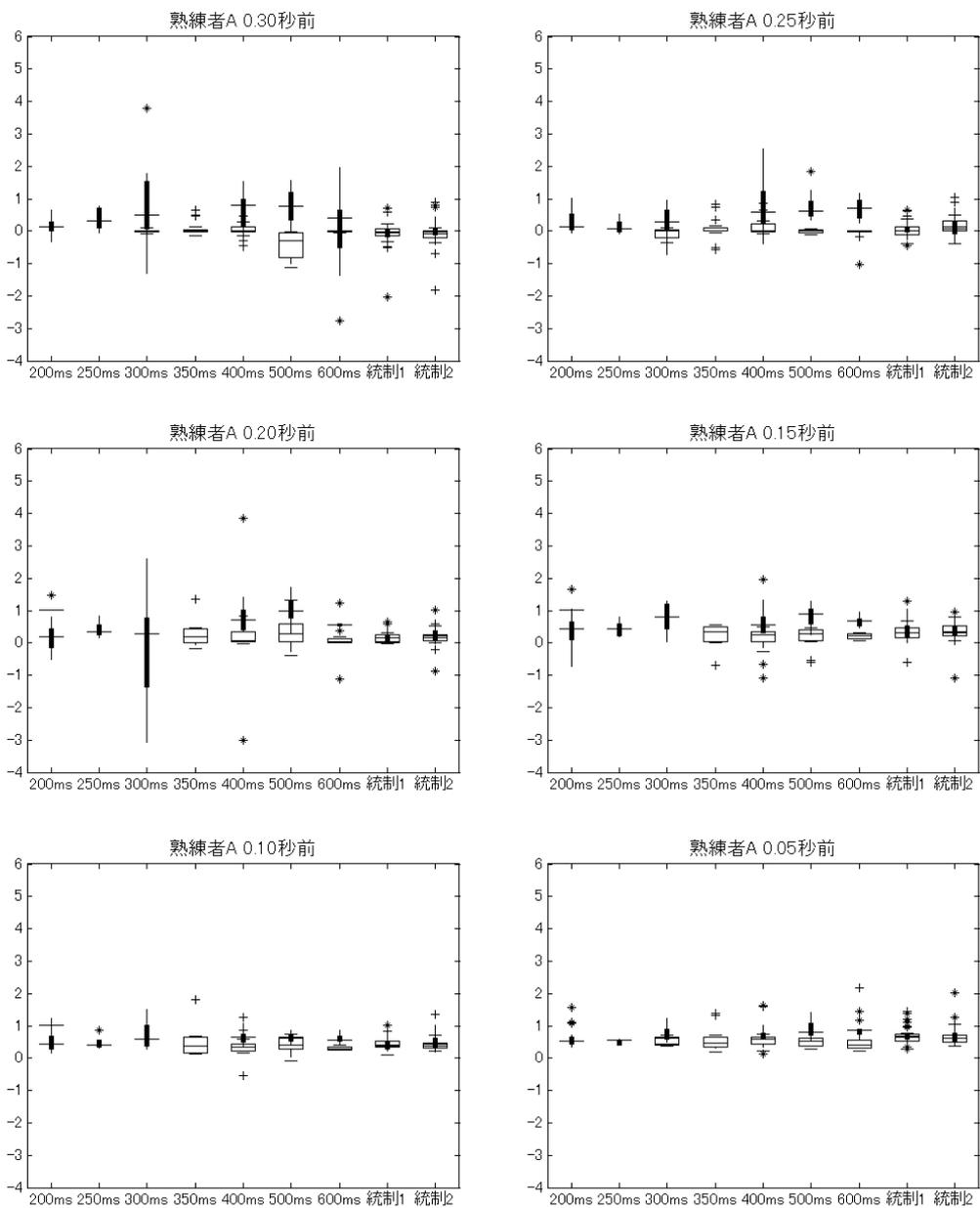


図 48 熟練者 A における各区間での $k(t)$ の値. 白抜ききの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

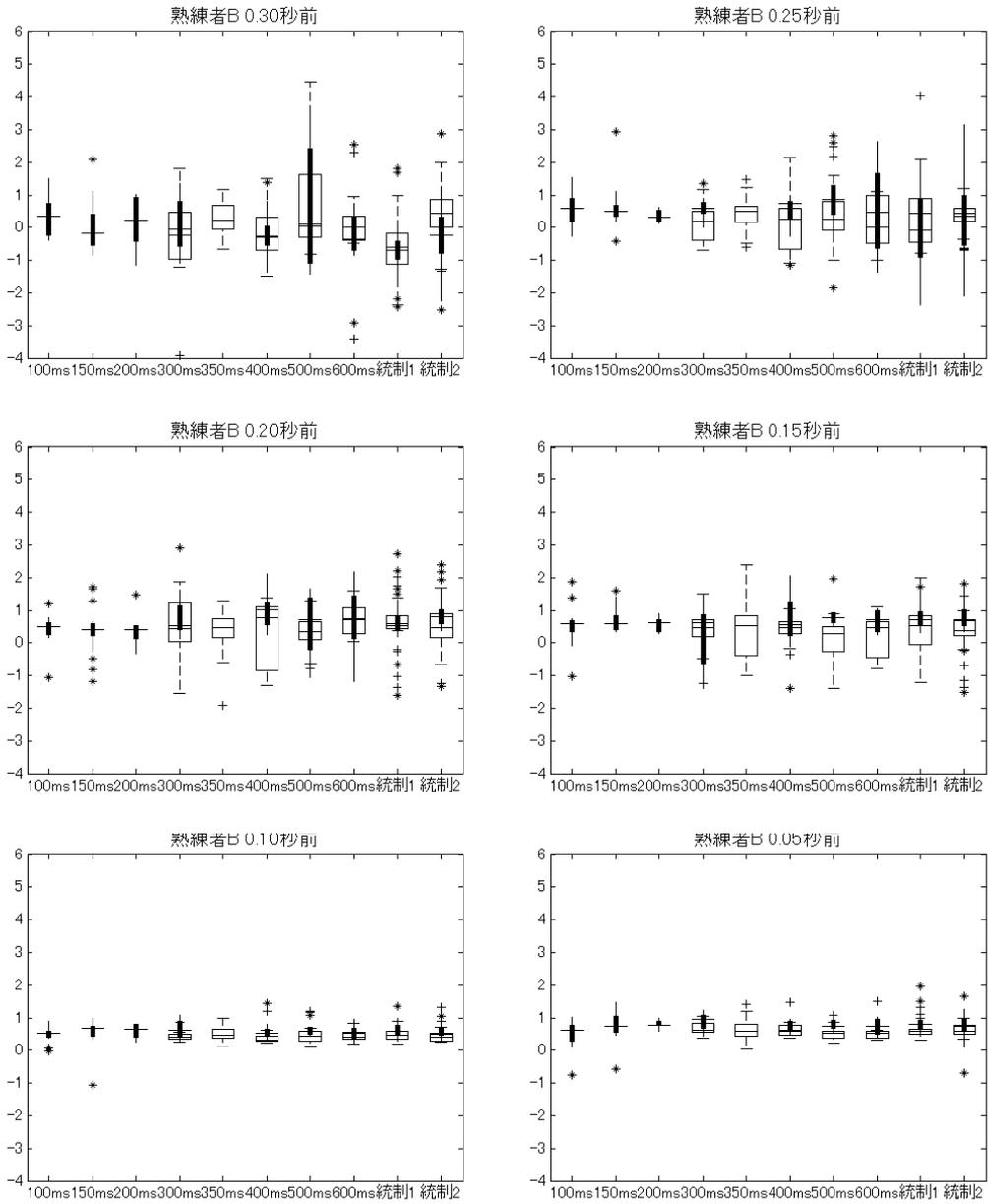


図 49 熟練者 B における各区間での $k(t)$ の値. 白抜ききの太いボックスと十字の外れ値は pre-test を, 黒塗りの細いボックスとアスタリスクの外れ値は post-test を示す.

表 18 熟練者 A において区間の効果がみられた遮蔽の各水準. 5%水準で有意であったもののみ記載.

水準	熟練者A
200ms	0.30秒>0.25秒, 0.20秒, 0.15秒
250ms	0.30秒,0.15秒<0.05秒
300ms	0.30秒<0.25秒, 0.20秒, 0.10秒 0.25秒>0.10秒 .25秒, 0.20秒>0.05秒
統制1	0.25秒>0.20秒, 0.15秒, 0.10秒□
統制2	0.25秒>0.10秒, 0.05秒

表 19 熟練者 B において区間の効果がみられた遮蔽の各水準. 5%水準で有意であったもののみ記載.

水準	熟練者B
100ms	0.10秒<0.05秒
150ms	0.15秒<0.10秒, 0.05秒
300ms	0.25秒, 0.10秒<0.05秒 0.30秒>0.10秒
350ms	0.30秒>0.15秒<0.10秒, 0.05秒
400ms	0.15秒<0.10秒, 0.05秒
500ms	0.25秒<0.20秒, 0.15秒 0.30秒<0.20秒
統制1	0.10秒>0.05秒

3.3 実験 2 考察

視覚情報を得やすくする玉の操作と頭部の姿勢

本実験では、課題の達成可能性をより高めることに寄与する視覚情報を得るための身体運動と、わざの成功との関係を検討することを目的とした。視覚を調整する運動として、操作として考えられる玉の運動の制御と姿勢としての頭部運動を分析した。実験結果から、3人の熟練者は、pre-test よりも post-test で、メガネのシャッターの開いている時間がより短い水準でふりけんを成功させることができるようになっており、その過程でシャッターの開閉タイミングと玉の軌道との関係や、ふりけん動作時の玉・頭部運動の制御方略が変化していた。

熟練者 A も熟練者 B も熟練者 C も、post-test では、シャッターが開いている時間幅の大小に関わらず、玉の軌道の頂点付近でメガネが開くようになった。さらに、シャッターの開くタイミングは、pre-test よりも post-test のほうでより一貫することが多かった。したがって、すべての熟練者はシャッターが開くときに玉が軌道の頂点に到達するように玉の運動を制御していたと考えられる。熟練者 A では、post-test では試行開始時にもシャッターが開いており、シャッターの開いている時間幅に応じて玉の前後方向移動範囲、速度が変化していた。これらのことから、試行の開始にシャッターの開くタイミングを合わせ、いったんシャッターが閉じた後に再度シャッターが開くタイミングで玉が軌道の頂点に到達するように、玉の軌道をシャッターの開閉時間に応じて変化させたのではないかと考えられた。それに対し、熟練者 B は、post-test では、玉の軌道の前後方向移動範囲、軌跡長、速度が遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件で大きくなる傾向があったものの、シャッターの遮蔽時間の幅に応じて軌道を変化させてはいなかった。熟練者 C には、post-test ではほかの 2 人と同様に、玉の運動の前後方向範囲が遮蔽の有無によって変化し、上下方向範囲と軌跡長、速度は遮蔽の有無による差はみられなかった

ものの、シャッターの開いている時間が長い水準のほうが短い水準よりも値が大きいという、シャッターの開閉時間による運動の変化があった。

一方、頭部運動については、すべての熟練者で、**post-test** では前後・上下方向移動範囲、軌跡長、速度が、遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件で大きくなる傾向があった。熟練者 B はシャッターの開いていた時間が短いほどに頭部運動が大きくなっていたのに対して、熟練者 A では軌跡長と速度に、熟練者 C では前後・上下方向範囲に遮蔽時間に応じた頭部運動の変化がみられたものの熟練者 B ほどの変化ではないようであった。

玉の運動と頭部運動との相互相関の結果で、顕著な変化がみられたのは、熟練者 B の前後方向の最大相互相関であった。熟練者 B では、**pre-test** では遮蔽の有無による差があるとは言えなかったが、**post-test** では遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が小さくなっていた。また、ラグが検出される区間についても、遮蔽あり条件の特にシャッターの開いている時間が短い水準において、ラグがより複数の区間で検出される傾向があった。このことは、熟練者 B では、遮蔽なし条件よりも遮蔽あり条件で、前後方向の頭部の運動は玉の運動とカップリングしていなかったことを示しており、おそらく厳しい制約下での視覚情報の探索に利用されたものと考えられる。一方、上下方向の CCF の結果は、熟練者 B では **pre-test** に、熟練者 C では両 **test** ともに、遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件よりも最大相互相関が大きくなる傾向があった。すべての熟練者において、遮蔽なし条件で見られるように、遮蔽あり条件でも上下方向の頭部運動と玉の運動が強くカップリングしていた。最大相互相関時のラグも、 -0.1 秒 ~ 0 秒の間に検出されており、遮蔽の有無によらず、頭部は予期的な制御が行われていた。

頭部中心座標系での玉の相対速度の制御について分析したところ、すべての熟練者で玉の軌道の頂点付近、つまり、遮蔽あり条件でメガネが開くタイミングに相当するところで、玉の相対速度の変化率(加速度)が小さくなっていた。またそのように加速度が小さくなる区間の時間幅は、**post-test** では、すべての熟練者において遮蔽あり条件のほう

が遮蔽なし条件よりも長くなっていた。このことは、玉の相対加速度を小さくする時間を長くすることで、シャッターが開いて視覚を利用可能なタイミングで、けんを玉に入れるときに利用する視覚情報を得やすくしていたことを意味すると考えられる。頭部中心座標系での玉の相対速度に影響を与える要因は、頭部と玉の運動である。熟練者 A と熟練者 C では玉の運動、熟練者 B では頭部運動がメガネの開いていた時間に応じて変化しており、遮蔽の有無による差も考慮すると、3 人の熟練者の制御方略は異なっていた。しかしながら、3 人とも、それぞれ玉もしくは姿勢のいずれかを主に変化させて、ふりけんを成功に導く視覚情報を得やすいように調整を行い、通常よりも視環境の制約が厳しい本研究の実験状況下でもふりけんを成功に導いていたのではないかと考えられた。また、すべての熟練者は pre-test の段階から玉や頭部の運動を条件によって変化させていたが、post-test のほうがより厳しい視環境の条件下でも成功しており、熟練者 A と B は post-test で相対速度の変化率を小さくする時間を長くすることに成功しており、学習によって視覚を助ける玉の操作と頭部姿勢の制御を獲得していったのではないかと考えられた。もちろん、そのような知覚的技能ではなく、ほとんど見えていない中でけんを玉に入れる行為、つまり遂行的な行為自体が上達し、そのおかげで post-test でふりけんが成功するようになった可能性もある。しかし、適切なタイミングで玉の特定の軌跡区間を視知覚できるようにするけん玉熟練者の玉の操作、頭部の姿勢制御が行われていることから、視覚情報をより得やすくする調整が、ふりけんを成功に導いた可能性が高いと考えられる。

けん玉熟練者が利用した情報

練習後に行われた post-test では、すべての熟練者は、玉の軌道が頂点付近に到達する際にシャッターの開いているタイミングが合っており、また、そのタイミングが合うように玉の制御を行っていた。軌道の特定区間を選択的に見るために玉を制御するという

こと、また、選択的に見えるようにしていた区間が軌道の頂点付近であるという結果は、van Santvoord & Beek(1994)のジャグリング研究の結果と同様であった。中級ジャグラーが玉の軌跡の頂点に引き続く区間を選択的に見ることができるようにしていた理由のひとつとして、van Santvoord & Beek(1994)は、その特定の区間が捕球をする手に対する接触までの時間、接触する場所を知覚するためのより価値のある情報を提供する可能性を挙げている。本研究の熟練者は、post-test で、シャッターが開くタイミングが玉の軌道の頂点付近と合っていたことから、頂点付近の情報がふりけんを成功させるために重要であったと考えられるが、その点については本研究と類似した点をもつ状況下で視覚情報を検討した Todd(1981)の研究が参考になる。Todd(1981)は、運動する物体についての視覚情報を検討する一連の実験のなかで、放物線軌道で観察者に接近する物体を一定の間隔でディスプレイ上に投影し、観察者に軌道の途中まで見せて、その物体が観察者の前に落ちるか、観察点に落ちるか判断をさせた。放物線軌道を描く物体が軌道の頂点に到達する前にディスプレイへの呈示を終了した場合と、軌道がちょうど頂点に到達した時点で呈示を終了する場合を比較し、軌道の頂点の情報が物体の落下位置についての判断に与える影響を検討したところ、観察者の判断の正確さにはあまり影響を与えなかった。判断に影響を与えていたのは、呈示される物体のサイズと加速度であり、それらが試行ごとに変化せず一定であるとき、物体がどこに落ちるかの判断が正確なものとなった。van Santvoord & Beek(1994)の研究で、頂点に「引き続く」区間が視覚的に選択されていたことと共に、この Todd(1981)の実験結果を考慮すると、本研究においても、頂点という幅の無い「点」が重要だったとは考えにくく、頂点を含む一定の幅を持った玉の運動を見ることが重要なのだと考えられる。その上で、本研究の状況下で熟練者が「頂点」の付近を選択的に見えるようにしていたのには理由があるだろう。理由として考えられるのは、放物運動する玉の速度はその軌道の頂点付近で小さくなるために玉自体を相対的に視認しやすく、また、その部分では、本研究では検討していないが、回転す

る玉の穴が熟練者から見える範囲にあるであろうことである。さらに、けんを玉に入れるまさにそのときにシャッターの開くタイミングを合わせても、けんをもつ手の運動を修正することは反応時間との兼ね合いですでにできなくなっているため、その少し手前にメガネの開くタイミングを合わせるほうがふりけんを成功させるためには効果的であろう。けん玉熟練者は、物理則に従って回転を伴い放物運動をする玉の頂点付近の「シーケンス」を視知覚して、けんを玉に入れるタイミングを予期的に制御していたのではないかと考えられる。

ふりけんではけんを玉に入れるときに利用する視覚情報について、本研究では、タウカップリングの分析によって調べた。まず、頭部運動のタウカップリングへの影響を調べるために、自転の τ_a とカップリングする公転のタウについて、頭部運動を考慮に入れない τ_d と頭部運動を考慮に入れた $\tau_{d(\text{local})}$ との時系列を用いて、カップリングしていた試行の数を算出した。その結果、熟練者 A の pre-test では、タウカップリングしていた試行数は $\tau_d \times \tau_a$ と $\tau_{d(\text{local})} \times \tau_a$ で差が認められなかったが、熟練者 A の post-test と熟練者 B の両 test では、 $\tau_{d(\text{local})}$ と τ_a とのカップリングのほうが多かった。したがって、特に熟練者 B では、頭部運動がタウカップリングをサポートしていたと考えられた。熟練者 B では、タウカップリングしていた区間での $\tau_{d(\text{local})} \times \tau_a$ の時系列の傾きをカップリング定数 k とする場合、 k の値に対する遮蔽の効果が pre-test でも post-test でも認められなかった。区間ごとに算出した $k(t)$ の値を検討した結果、熟練者 B ではけんと玉との接触 0.30 秒前の区間に遮蔽の効果が見られたが、その他の区間には差は検出されなかった。熟練者 A では、タウカップリングしていた区間での $\tau_{d(\text{local})} \times \tau_a$ の時系列の傾きをカップリング定数 k とする場合は pre-test のみ、遮蔽の効果が認められなかった。また、各遮蔽条件で区間の効果があるのかを調べたところ、カップリングしていると考えられる区間 (0.20 秒前~0.05 秒前) では、ほとんど差が認められなかった。熟練者 A において、区間ごとに算出した $k(t)$ の値を検討した結果、接触 0.25 秒前と 0.05 秒前に遮蔽の効果による差

が認められたが、熟練者 A のタウカップリングの区間の平均が pre-test では約 0.20 秒、post-test では約 0.25 秒であったことを考えると、カップリングしていた区間では、接触直前の 0.05 秒前以外は、遮蔽の効果が認められなかった。各遮蔽条件で区間の効果があるのかを調べたところ、明確な傾向は認められなかった。これらのことから、熟練者 A と熟練者 B は、玉の運動や頭部の運動は遮蔽の有無によって変化していたが、公転と自転の接触の制御に関しては、変化しているとは言えなかった。熟練者 C は、カップリングをしていたとみなせる試行数が少なかった。これは、実際に熟練者 C がタウカップリングの方略を利用していなかったからかもしれないが、可能性としては、熟練者 C の視力に起因するものであると考えられる。本実験では遮蔽メガネを用いたため、普段眼鏡をかけている熟練者 C は眼鏡をかけることができなかった。そのために玉の穴への追従は通常よりも難しくなっており、結果的にタウカップリングしていたとみなせる試行数が少なかったのかもしれない。熟練者 C はタウカップリングを利用していなかったとすると、タウカップリングを用いなくてもふりけんを成功させることができると言える。

本研究において、メガネのシャッターが開いていたときに利用された視覚情報は、Ito et al(2013)で検討されたタウカップリングであるかもしれない。けん玉動作を *interceptive action* と捉えれば、光学的加速を情報としていることや、あるいは、その他の情報を利用している可能性も考えられる。本研究で利用されていた視覚情報については複数の候補があるが、どのような情報を使っていたにせよ、行為者の頭部運動を考慮に入れてその情報を検討するべきであろう。

けん玉熟練者の学習

本研究では、けん玉熟練者は pre-test よりも post-test で、玉を視認できる時間がより短い条件でもふりけんを成功させることができるようになっており、練習を経ることで視環境制約下での成功方略を学習したと考えられた。3人の熟練者は、post-test において

玉の軌道の頂点付近を見えるようにする傾向があり、玉や頭部を状況に応じて変化させ、その軌跡区間からふりけんを成功させる情報を得ていたものと考えられた。一方で、熟練者 A は pre-test と post-test で遮蔽に対する玉・頭部運動が変化する場合が多く、ほとんどの場合両 test の同一水準で pre-test と post-test での差がみられたのに対し、熟練者 B は pre-test と post-test で遮蔽に対する頭部運動が変化していたものの、両 test の同一水準での値の差は頭部ではあまりみられなかった。熟練者 C では、遮蔽の有無による制御の変化は玉の運動では一部みられたが、頭部運動では両 test 間で遮蔽あり条件のほうが遮蔽なし条件より値が大きいという同じ傾向があり、両 test の同一水準間での比較では、差のみられる項目もあるが、玉の運動の上下方向範囲、頭部運動の前後方向範囲と軌跡長には同一水準間での差があまりみられず、熟練者 A ほどには test 間での差がみられなかった。個人によって本実験での学習には差があると考えられた。また、本研究では十分に分析できてはいないが、特に pre-test において、その test 内での制御方略の学習もあったであろう。

本研究におけるけん玉熟練者の学習は、Direct learning(Jacobs & Michaels, 2007)の理論で説明できるかもしれない。Direct learning では、どのような情報を利用していたのか、また、ある情報の組み合わせを利用するようになったとして、情報への重み付けをいかにするのかという観点から学習を説明する。本研究でのけん玉熟練者の学習も、このような情報利用の変化として示すことができるかもしれない。ただし、そのためには、けんを玉にいれるときに熟練者がどのような視覚情報を利用する可能性があるのかをまずは特定しておく必要がある。Direct learning の理論を利用し、ふりけんて利用されていた情報とそのときの身体運動とを関係付けて分析すれば、本研究で明確に言えなかった視知覚を得やすくする運動とふりけんて利用される情報との関係を議論することができるだろう。さらに、本研究でのけん玉の学習を知覚情報の利用という観点から示すことができれば、主にダイナミックタッチの枠組みを利用した実験を行う Direct learning

の研究の一般化に貢献するところがあるだろう.

4章 総合考察

本研究では、熟達化の新たな一面を検討可能なエコロジカル・アプローチのアイデアを利用し、熟達化について調べてきた。エコロジカル・アプローチは、知性は身体—情報—環境系で成立すると捉えるものであった。エコロジカル・アプローチの観点からは、熟達したふるまいは、情報によって成立し、情報の探索と知覚的な利用によって構築されると考えられ、この点はエコロジカル・アプローチに特有のものであった。エコロジカル・アプローチの立場から熟達化を見てみると、変化する身体—環境系においてある行動が成立するとき、その行動に利用される情報が静的であるわけではないので、情報を知覚探索する身体と手による操作の制御が問題となると考えられた。適応的熟達者や *dexterity* の定義からも、熟達者の変化に対応するという側面がどのように成立するのかを明らかにすることは重要であると考えられた。本研究では、スキルを必要とし、動的なタスクであるけん玉の「ふりけん」を実験課題とした。第一実験で、情報を知覚探索する身体と玉の運動の操作とふりけんて利用される情報を分析した。第一実験では、情報を視覚的に探索する身体を姿勢と捉え、頭部運動とけん玉のわざの成功のために重要であると考えられてきた膝の運動に着目して、初心者群と熟練者群の姿勢制御を比較した。第二実験では、けん玉熟練者を対象にし、視環境制約下での玉の運動と頭部運動の変化とその学習を分析することで、物理的・知覚的に環境との関係を変え得る視覚を調整する運動(玉の操作と姿勢としての頭部)の役割を検討した。また、第二実験では、視覚情報に対して遮蔽や学習が与える影響を分析した。2つの実験の結果にもとづいて、何が熟練者群のふりけんを洗練されたものにしてしているのかについて Gibson の行動制御理論(1958, 1966, 1979)の観点から考察し、本研究の熟達化研究への貢献そして今後の展望について議論する。

変動する系での行動の成立を支える視覚を助ける制御

本研究では、ふりけんという、global flow と local flow が問題となる技を実験課題とし、ふりけんをするときの身体—環境系において、視覚情報を探索する身体の制御を第1実験で問題とした。第2実験ではその視覚探索運動としての姿勢と手の操作という視覚を調整する運動に着目して、玉の運動と姿勢を分析した。また、どちらの実験でも、ふりけんを実行するときに探索され、利用されるであろう視覚情報を検討した。その結果、次のことが明らかになった。まず、第1実験から、けん玉熟練者の姿勢は、玉と頭部の動的な視覚的カップリングとそれを支える膝の運動に特徴づけられることが明らかになった。そのような姿勢制御をすることによって熟練者は視覚を安定化させ、けんを玉の穴に入れるのに必要な視覚情報を得やすくしていると考えられた。また、第1実験における初心者群と熟練者群との玉の軌道・回転の違いも、ふりけんを成功させるときに利用される視覚に影響を与えており、熟練者群のほうがふりけんタスクの達成を促進するような玉の運動になっていたと考えられた。第2実験では、けん玉熟練者は視野遮蔽メガネ装着のもと、ふりけんを行った。第2実験の結果から、学習によって視覚探索する身体や玉の運動の調整が、視覚情報を得やすくするようなものに変化しており、そのような運動の制御になることで、ふりけんの成功率があがったと考えられ、視覚の調整がパフォーマンスの改善につながる事が示唆された。したがって、本研究が行った2つの実験からは、視覚の安定を導く視覚的な制御が巧みなふるまいにおいて重要であることを示したと言えるだろう。

また、本研究ではふりけんにおいて制御されている視覚情報について検討するため、タウカップリングの分析を行った。第2実験の結果から、頭部の影響を含めた公転と自転のタウのタウの比で示されるカップリング定数の値は、遮蔽の有無による明確な影響がみられず、二人の熟練者で一定の値に収束する傾向があった。しかしながら、カップリングに影響を与える頭部や玉の運動は、実験2において遮蔽の有無によって変化していた。この結果から、けん玉で利用される情報の探索と利用が行われ、global flow と local flow の制

御がなされたときに、運動はタスクに応じて柔軟に制御され、結果的にカップリング定数は一貫した値になるという法則的な関係が生じたのではないかと考えられた。このような結果は、近年運動制御の分野で協調運動の解析に利用されており、システムのすべての変数が制御されるのではなく、課題にとって重要な変数が制御され、そうでない変数は制御されないとする **Uncontrolled Manifold 仮説**(Latash, et al., 2007 など)にも関係が深いと考えられる。

けん玉においては、膝の運動が重要であると一般的、経験的に言われている。本研究のふりけんにおいて、膝は視覚的に制御され、情報探索において頭部と玉との関係を支え、視覚の安定化に寄与する重要な役割を果たしていると考えられた。けん玉において膝が重要であると言われる理由のひとつには、膝が視覚の安定に役立つということがあるだろう。ただし、膝の運動は、安定した玉の軌道を生成することにも利用されることや、玉をけん先や皿でキャッチするときに接触時の衝撃を和らげるように利用されることもある。けん玉の技によって、膝によって視覚を安定させることがどの程度意味をもつのかは異なるであろうが、けん玉で生じるオプティック・フローの制御に膝の運動が寄与するところはあるだろう。

けん玉における熟達したふるまいの構造

本研究では、熟達化を明らかにする上で、けん玉熟練者の視知覚に着目し、視知覚を目だけではなく頭部一身体システムで制御されるものとして捉えた。そして、けんを玉の穴に入れるというタスクの達成を担う「運動」としてだけではなく、同時に、身体に埋め込まれている視覚的にタスクの達成に関わる姿勢・操作がわざの成立に関わる影響を検討した。しかしながら、そのような方法だけが熟達化を明らかにするものではない。他の熟達に関する研究では、言葉との関係で熟達化が議論されることが多い。そのような研究の背景にあるのは、身体に認識の働きをみる研究に多大な影響を与えている

Polanyi(1966)が暗黙知の詳記不能性を指摘し、“私たちは言葉にできるより多くのことを知ることができる(Polanyi, 1966, 高橋訳 2003 p.18)”と述べていることに由来すると考えられる。一方で、Polanyi(1958, 1966)が暗黙知と呼んだのは、次のような認識である。すなわち、人間の認識には明確化できない知識がその不可欠な部分として存在し、それがあってはじめて明確な認識が生じるというものである。暗黙知は、近接項と遠隔項という構造からなりたっている。例えば、杖をついて歩くとき、わたしたちがはっきりと意識するのは、手で直接触れている杖についての感じではなく、杖の先で触れたものについての感じである。この事例で言えば、前者が近接項であり、後者が遠隔項である。遠隔項の知識は、近接項の知識に依存しており、近接項があるゆえに存在するが、わたしたちが直接気づきやすく、接近しやすいのは、遠隔項の知識である(宮崎・上野, 2008)。ふりけんにおける「玉を見やすくする運動」を近接項、「けんを玉に入れる運動」を遠隔項と考えると、ふりけんにおける身体運動は、暗黙知の構造をもつと言えるかもしれない。Polanyi(1958, 1966)の指摘する構造と同様の指摘は、Bernstein(1996, 工藤訳 2003)も行っている。Bernstein(1996, 工藤訳 2003)によれば、動作には、先導レベルと背景レベルがある。先導レベルとは、動作の中核をなす部分の制御を担うものであり(工藤, 2003)、背景レベルとは、先導レベルを支えるものである(工藤, 2003)。また、“人間は先導レベルが制御する対象に関係のある情報しか自覚できない(Bernstein, 1996 工藤訳 2003 p.228).”先導レベルと背景レベルとの関係は、Bernstein の著書の中で繰り返し指摘されているが、例えば次のように書かれている。

“当然のことだが、古いレベルは、最も基本的で動作全体の制御に関わるような重大な調整を担当できない。しかし、先頭に立つ基本的な調整には何も問題がなくとも、二次的な多くの要素が足りないために動作が不完全なものになることがよくある(これから見ていくように、これは例外ではなく、むしろ法則であ

る)。その場合、低次レベルが協力して必要な補助を行う。このような動作では、高次のレベル Y が主導的な立場にあり、動作の意味や成否を左右するような基本的かつきわめて重要な調整に対して責任を負う。このとき低次のレベル X はエンジンの潤滑油の役目を果たす。その調整によって、動作はより簡単に、よりなめらかに、よりすばやく、より捗り、より巧みになり、成功する確率が高くなる。つまり、これらの補助的な調整は、動作をおもとから支える背景であるといえよう。(Bernstein, 1996 工藤訳 2003)”

運動制御研究においては、基本的には、いかにタスクを実行するかという運動制御のほうに焦点化されやすく、検討の対象となってきた。本研究で焦点をあてた玉を見やすくする運動は、けんを玉に入れるというタスクそのものを実行する運動とはその役割が区別されるが、タスクを実行する運動と同時に成立している。特に知覚的に環境との関係を変え得る目一頭部一身体系は、運動制御研究のなかで十分に検討されてきたとは言えない。しかし、本研究で示唆されたように、おそらくは行為者にとって自明ではないが、ふりけんを成功に導く情報の検出に関与する、知覚をしやすくする運動が機能しているからこそ、けんを玉に入れるようなタスクを実行する運動が意味をなし、けん玉における巧みなふるまいが成立しているのではないだろうか。

知識を「伝える」こと

わたしたちは日々の生活において他者を含めた環境と関わり、知識を得る。わたしたちは、その得た知識を自分のためだけに利用するのではなく、他者と共有し、学習や教育に活かしてきた。さらには、世代を超えて知識を伝えることで文化を形成してきた。本研究のような「わざ」というのも、知識が個人を超えて共有されることで、形成されてきた文化と言えよう。一方で、初心者が熟達者の真似をしても、熟達者と同じようにふ

るまうことができるわけではないことも指摘されている(生田, 2007). では, どうすれば初心者は知識を得ることができるのだろうか. 熟達者の何を真似すればよいのであろうか. 知識を他者に「伝える」, 知識が他者に「伝わる」とはどのようなことなのか.

生田(2007)は, 「わざ」について議論した著書のなかで, “「わざ」の習得の究極目標は「形」の完璧な模倣を超えた「型」の習得(生田, 2007 p.23)”であると述べ, 「わざ」の熟達化を「形」から「型」への変化として捉えている. 「形」と「型」は次のように説明されている.

“「形」は外面に表された可視的な形態であり, 各「わざ」の世界に固有の技術, あるいは技能を意味している. 例えば日本舞踊の「形」, あるいは能の「形」とは各界に固有の技術の体系が身体動作に表されたものであり, 手続きの連続として記述することができる. これに対して, 「型」は先に「現実感を持った人間として生存する基本」と考えたが, 簡単に言うならば人間の生活のなかで生じてくる「形」の意味と言ってよいかもしれない(生田, 2007 p.23).”

“「型」の習得は明らかに外面的な「形」の習得を含んでいる. 事実, 「型」には優先的に外面的な「形」としての身体の動きをつかさどる能力としての「技能」の側面がある. しかし, 「型」と「形」は, 決して同じものではない. ... 学習者は各界に固有な技術体系としての「形」の習得をまずもってしなければならないことも厳然たる事実である. しかしながら, 彼らが究極的に目指すものは「形」の完璧な模倣ではなく, いわばそれを超えた「型」の習得にあると言わなければならない(生田, 2007 p.24).”

この「形」と「型」の違い, 「形」から「型」への変化を本研究で実験課題としたけん

玉のふりけんを事例として考えてみよう。けん玉初心者が、ふりけんを練習するとする。練習でけん玉初心者は、熟達者の真似をして、けん玉で重要だと言われている膝の運動を用いて、膝を屈曲させてふりけんをすらしよう。このとき、本研究の結果にもとづけば、玉の回転不足のために、けんを玉に入れるフェーズで玉の穴が必ずしも初心者に見えるわけではないので、たとえ膝を曲げたとしても、膝の運動が頭部と玉とのカップリングを支え、視覚の安定化をサポートするわけではない。この時点では、初心者のふりけんは手続きの連続としての「形」であろう。しかしながら、初心者が意図したわけではなくても、けんを玉に入れるフェーズで、玉の穴が初心者に視知覚される程度に玉が回転していて、そのときに膝を曲げていたことで視覚が安定化し、けんを玉に入れることができるということがあり得るだろう。あるいは、そのときにふりけん成功しなくても、けんを玉にいれるときに膝を曲げると玉を視認しやすくなることに、非自覚的ではあっても「気がつく」かもしれない。そして、ふりけん最終フェーズでの膝の運動と玉の運動との関係を学習した初心者は、手続きとして膝を曲げるのではなく、自分が見ている玉の運動に対して膝を曲げるようになる、ということがあり得るのではないか。そのようにして膝が知覚探索する身体の一部として機能し、調整され、ふりけんが成功するようになっていくということがあり得るのではないか。もしこのような状態—いわば、知覚情報にガイドされた状態—になれば、このときの初心者のふりけんは「型」とまでは言えなくとも、「形」を超えたものであると考えられる。

身体—情報—環境系のふるまいを知性と考えるエコロジカル・アプローチでは、熟達者は彼あるいは彼女と環境とのあいだで特定される情報を利用することで、ある「わざ」を達成しており、したがって、熟達者—情報—環境系のふるまいが「型」だと言える。このときの熟達者の「型」というのは、その熟達者—情報—環境に特定のなものである。だから、初心者が熟達者の「型」の一部を真似しても、その熟達者の系で成立する「型」を真似するわけではないので、「形」となってしまうのであろう。したがって、知識の「伝

達」において重要なのは、情報を介した身体—環境系である。しかしながら、これは「形」に意味がないということを示してはいない。なぜなら、先のけん玉の事例での「形」としての膝の運動のように、「形」は初心者—環境系において必ずしも情報を得やすくするわけではないが、初心者—環境系の条件次第では、ふりけんを成功に導くアフォーダンスを顕在化させ、知覚行為カップリングの形成を促す役割を果たしうるからである。「形」の実践によって初心者が「形」の意味(生田, 2007 p.23)に気付き、「形」を超え出たふるまいを学習することもあり得ると考えるならば、最終的に目指すのは「型」であっても「形」を繰り返すことは学習にとって意義あるものだと言えるだろう。

エコロジカル・アプローチの観点から「形」から「型」への変化としての学習を考えてみると、ある領域の初心者が、ある行為の可能性としてのアフォーダンスを特定する情報を利用できるようになるということが重要であろう。同じタスクを行っていても、「形」を実行する初心者は、必ずしも熟達者と同じ情報を利用できるわけではない。しかしながら、環境にいる行為者が移動することによって、ある観察点では見えなかったものが別の観察点では見えるようになるということのように、初心者の移動によって熟達者—環境系に存在する情報が初心者にも利用できるようになりうるのである。あるいは初心者の操作や環境側の変化によっても情報が利用可能になりうるだろう。この意味でエコロジカル・アプローチにおける知覚は公共的なものである(Gibson, 1979)。知覚情報は共有されうるのだ。別の個人であっても、他者と同じ行為の可能性を特定し環境に存在する情報を利用することができれば、それこそ、知識が「伝わる」ことであると考えられる。

本研究の意義と今後の展望

本研究では、知性としてのふるまいは、知覚情報によって特定されるアフォーダンスを基盤とする身体—環境システムにおいて成立すると考えるエコロジカル・アプローチ

の立場から、けん玉のふりけんの熟達化を検討してきた。本研究の結果から、玉の制御に加え、情報を視知覚する身体という、視覚を助ける運動の調整がけん玉熟練者のわざの成立をサポートすることが示された。また、情報によって制御される場合に、身体の制御において変動が小さいところと、柔軟に制御される部分があることも示唆された。最後に、本研究の意義と今後の課題について述べる。

本研究の意義の一つは、変化に臨機応変に対応しうると言われている熟達者の「知」に対して、行為を導く情報を知覚探索する身体の重要性を指摘し、けん玉操作の事例から、けん玉熟練者のわざが、知覚情報を得やすくする姿勢や操作によって支えられていることを示した点にある。近年の熟達化研究では、身体そのものの表現が重視されたり、また、身体だけではなく、環境の変動があるなかで行為が成立することから、ヒトをとり囲む環境も重視されるようになっており、身体—環境系の相互作用が検討されるようになってきている。しかしながら、身体—環境系の巧みなふるまいの成立は、情報を基盤として考えられていない。一方で、本研究のエコロジカル・アプローチの要は、行為者—環境系に存在する知覚情報にある。また、Gibson 理論(1966, 1979)での知覚とは、刺激を感受する感覚器官や神経系のはたらき、脳による解釈過程ではなく、行為に利用する知覚情報を環境で能動的に探索し検知する知覚システムとして定義される。本研究では、臨機応変にふるまうことができる熟達者の知性を明らかにする上で、知覚を Gibson(1966, 1979)が指摘した意味で捉え、行為者の視覚に影響を与える姿勢と操作を分析した。その結果、熟達したふるまいが情報にもとづいて行われ、情報を利用しやすいように探索によって視覚を安定化させ、タスクの達成に寄与することを示した。本研究によって情報に根ざした姿勢、操作の制御が熟達化において重要な一側面であることが示されたと考えられ、この点において、本研究は熟達化研究への貢献があるものと考えられる。視覚情報の探索は、本研究のように時空間的な制約が厳しいなかでいかに安定した視覚を得るのが問題になるような運動タスクにおいても有効であろう。

本研究が検討してきた姿勢とは、Gibson(1979)が指摘した移動のことであり、視覚と関わっていることである。姿勢を知覚という側面を問わず、「タスクの達成をサポートするもの」というように広く捉えてみると、序論で触れた、陶芸における菊練りの分析では、熟練者における体幹の重要性が示されており、巧みな運動における姿勢の役割を検討していると言える。Bernstein(1996)もまた、姿勢の重要性を指摘していた。そのような観点からすると、本研究では、姿勢という観点から巧みさを検討しており、巧みさにおける姿勢の意義を示したものと言える。ただし、姿勢を移動よりも広い観点で定義したとしても、本研究の知見が有効なタスクとそうでないタスクがあるのは明らかである。本研究のふりけんでは、遮蔽条件下など、環境の文脈が異なるときにでも同一のタスクを繰り返すことが問題となるのに対し、例えばチェスなどでは、対戦相手が存在し、その対戦相手に応じてふるまいを変化させる。本研究はすべての熟達化研究に対して有効な知見を提供できるわけではないが、少なくとも、時空間的な制約が厳しいなどで探索が問題となるタスクに対しては示唆のある研究であろう。

本研究の別の貢献としては、全身で制御される視知覚をわたしたちの文化のなかで実際に行われている、こつの必要なタスクで検討したという点にある。Gibson(1966, 1979)によって視知覚は全身で制御される能動的な探索システムであることが指摘されている。エコロジカル・アプローチの知覚運動研究では、Stoffregen et al.(1999 など)による姿勢研究がGibson(1966, 1979)の視覚システムの拡張として行われている。しかしながら、本研究のような操作を伴うタスクで姿勢を検討してはおらず、時空間的な制約が厳しいタスクで姿勢がどのように協調しているかについて検討しているわけではなかった。一方、身体運動研究や視覚研究では、視線が計測されることが多々ある。熟練者群と熟練者とはスキル群を比較した場合に、視線をどこに向け、何に注目するのかが異なることが多くの研究で明らかにされている。しかしながら、視線と観察点の移動は異なるものである。視線は頭部や身体の影響をうけるなかで成立する。私たちが環境を見る

ときには、頭部や頭部を支える身体を静止させ、視線を利用するだけでなく、頭部や身体が移動するなかで視線を利用することもある。本研究では、ふりけんにおいて熟練者の玉の運動と動的に協調する頭部運動、それを支える膝の運動という全身での視知覚を示した点にも本研究の意義があると考えられる。しかしながら、本研究では、姿勢としての頭部運動や膝の運動を検討したものの、目の運動については検討できておらず、ふりけんでの行為者の視知覚特性を十分に明らかにできているわけではない。したがって、ふりけんをする行為者の視線計測などを行い、目―頭部―身体という全身で制御される視知覚の特性を今後より明らかにする必要がある。

本研究では、けん玉という特殊性の高いタスクでわざの成立を検討した。しかし、特殊ではあるものの、けん玉は実際に私たちの文化で培われてきたタスクである。日常に目を向けてみれば、わたしたちは何か物を見るときに視認しにくければ頭や身体を物に近づけたり、物を自分の見やすいように動かしたりする。同時に、物と手に自分の頭が接近したことを光学的情報により知る。しかしながら、このような姿勢や操作の制御は十分に検討されているわけではない。したがって、今後、熟達化や行動の成立を考える上で、情報を得やすくし、知覚を助ける姿勢や操作の意義を検討することが重要になると考えられる。

文献

- 安藤花恵(2005). 演劇の心理学—演劇の熟達者とは 子安増生(編) 芸術心理学の新しいかたち 誠信書房 pp.199-224.
- Austin, H. A. (1976). *A Computational Theory of Physical Skill*. Unpublished doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Bardy, B. G., & Laurent, M. (1998). How Is Body Orientation Controlled During Somersaulting? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, 963-977.
- Barlow, D. H., & Hersen, M. (1984). *SINGLE CASE EXPERIMENTAL DESIGNS: Strategy for Studying Behavior Change*. Pergamon Press.
- (バーロウ, D. H. & ハーセン, M. 高木俊一郎・佐久間徹(監訳) (2005). 一事例の実験デザイン—ケーススタディの基本と応用 二瓶社 第5刷)
- Barrett, L. (2011). *Beyond the Brain: How Body and Environment Shape Animal and Human Minds*. Princeton University Press.
- (バレット, L. 小松淳子(訳) (2013). 野性の知能 インターシフト)
- Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In M. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*. Mahwah, NJ: Erlbaum, pp. 3–244.
- (ベルンシュタイン, N. A. 工藤和俊(訳) 佐々木正人(監訳) (2003). デクステリテイ 巧みさとその発達 金子書房)
- Bootsma, R. J., & van Wieringen, P.C.W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 21-29.
- Brooks, R. A. (1986) Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE*

Journal of Robotics and Automation, **2**, 14-23.

Brooks, R. A. (1991). Intelligence without Representation. *Artificial Intelligence*, **47**, 139-160.

Carello, C., & Turvey, M. T. (2000). Rotational dynamics and dynamic touch. In M. Heller (Ed.), *Touch, representation, and blindness* (pp. 27-66). Oxford, England: Oxford University Press.

Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics*, **36**, 868-870.

Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, **4**, 55-81.

Craig, C. M., & Lee, D. N. (1999). Neonatal control of nutritive sucking pressure: Evidence for an intrinsic tau-guide. *Experimental Brain Research*, **124**, 371-382.

de Groot, A. D. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague, The Netherlands: Mouton Publishers.

Ericsson, K. A. (1996). Preface. In K. A. Ericsson (Ed.), *The road to excellence: The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games* (pp. vii-x). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Ericsson, K. A., & Smith, J. (1991). Prospects and limits of the empirical study of expertise: An introduction. In K. A. Ericsson and J. Smith (Eds.), *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1-38

Fajen, B. R., Riley, M. R., & Turvey, M. T. (2009). Information, affordances, and the control of action in sport. *International Journal of Sports Psychology*, **40**, 79-107.

藤波努(2009). 陶芸における菊練り 知の科学 スキルサイエンス入門—身体知の解明へのアプローチ オーム社 pp.231-238.

藤波努・山本知幸・阿部 真美子(2004). 身体技能に見られる階層性と「あそび」に関する考察. 第18回人工知能学会全国大会予稿集, 3D1-04.

Howard E. G(1985). H. E. The Mind's New Science: A History of The Cognitive Revolution. Basic Books, Inc. New York, NY, USA

(ガードナー, H. 佐伯胖・海保博之 (監訳)(1987). 認知革命—知の科学の誕生と展開 産業図書)

Gibson, J. J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, **49**, 182-194.

Gibson, J. J. (1961). Ecological optics. *Vision Research*, **1**, 253-262.

(境敦史 (訳) (2004). 生態光学 リード, E. ジョーンズ, R. (編) ギブソン, J. J. (著) 境敦史・河野哲也(訳)ギブソン心理学論集 直接知覚論の根拠 勁草書房 pp. 39-61)

Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.

(ギブソン, J. J. 佐々木正人・古山宣洋・三嶋博之(翻訳) (2011). 生態学的知覚システム—感性をとらえなおす 東京大学出版会.)

Gibson, J. J. (1968). WHAT GIVES RISE TO THE PERCEPTION OF MOTION? *Psychological Review*, **75**, 335-346.

(境敦史 (訳) (2004). 生態光学 リード, E. ジョーンズ, R. (編) ギブソン, J. J. (著) 境敦史・河野哲也(訳)ギブソン心理学論集 直接知覚論の根拠 勁草書房 pp. 127-146)

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton.

(ギブソン, J. J. 古崎敬・古崎愛子・辻敬一郎・村瀬旻(共訳) (1986). 生態学的視覚論—ヒトの知覚世界を探る サイエンス社)

Glaser, R., & Chi, M. T. H. (1988). Overview. In M. T. H. Chi, R. Glaser, & M. J. Farr

- (Eds.), *The nature of expertise* (pp. xv-xxviii). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. *Cognitive Psychology*, **31**, 1-40.
- Gobet, F. (1999). Chess, Psychology of. In Wilson, R. A., & Keil, F.C. (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences (MITECS)*. The MIT Press. pp.113-115.
- (伊藤毅志(訳)(2012). チェスの心理学的研究 中島秀之 (監訳) MIT 認知科学大辞典 共立出版 pp.892-895.)
- 波多野誼余夫・稲垣佳世子(1983). 文化と認知 八木冕(監修) 坂元昂(編) 現代基礎心理学 7 思考・知能・言語 東京大学出版会 pp.191-210.
- Honaker, J., King, G., & Blackwell, M. (2011). Amelia II: A Program for Missing Data. *Journal of Statistical Software*, **45**, 1-47.
- Huys, R., & Beek, P. J. (2002). The coupling between point-of-gaze and ball movements in threeball cascade juggling: the effect of expertise, pattern and tempo. *Journal of Sports Sciences*, **20**, 171-86.
- 生田久美子 (2007). 「わざ」から知る. 東京大学出版会.
- Ito, M., Mishima, H., & Sasaki, M. (2013). Role of head movement in tau coupling of ball and handle coordination. In Davis, T., Dicks, M., Passos, P., & Weast, J. A. (Eds.), *Studies in Perception & Action*. Vol.12, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., pp9-13.
- Jacobs, D. M., & Michaels, C. F. (2007). Direct Learning, *Ecological Psychology*, **19**, 321- 349.
- Kayed, N.S.. & van der Meer. A.L. (2009). A longitudinal study of prospective control in catching by full-term and preterm infants. *Experimental Brain Research*, **194**, 245-258.

- 小嶋秀樹(2010). 認知ロボティクスにおける「学び」 佐伯胖(監修) 渡部信一(編)「学び」
の認知科学事典. 大修館書店. pp.509-524.
- 工藤和俊(2003). 主要語句解説 ベルンシュタイン, N. A. 工藤和俊(訳) 佐々木正人(監
訳) デクステリテイ 巧みさとその発達 金子書房 pp.307-314.
- Lee, D. N. (1974). Visual information during locomotion. In R. B. MacLeod & H. Pick
(Eds.), *Perception: Essays in honor of J. J. Gibson*. Ithaca, NY: Cornell
University Press, pp. 250-267
- Lee, D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about
time-to collision. *Perception*, **5**, 437-459.
- Lee, D. N. (1998). Guiding movement by coupling taus. *Ecological Psychology*, **10**,
221-250.
- David N. Lee, D. N., & Aronson, E.(1974). Visual proprioceptive control of standing in
human infants. *Perception & Psychophysics*, **15**, 529-532.
- Lee, D. N., Craig, C. M., and Grealy, M. A. (1999). Sensory and intrinsic coordination
of movement. *Proceedings of Royal Society of London B*, **266**, 2029-2035.
- Lee, D. N., Georgopoulos, A. P., Clark, M. J., Craig, C. M., and Port, N. L. (2001).
Guiding contact by coupling the taus of gaps. *Experimental Brain Research*, **139**,
151-159.
- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long
jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and
Performance*, **8**, 448-459.
- Lee, D. N., & Young, D., S. (1985). Visual timing of interceptive action. In Ingle D. J.,
& Jeannerod, M. & Lee, D. N. *Brain Mechanisms and Spatial Vision*.
Dordrecht:Martinus Nijhoff.

(堀口裕美 (訳) (2001). 視覚情報による行為のタイミング制御 佐々木正人・三嶋博之 (編) アフォーダンスの構想—知覚研究の生態心理学的デザイン 東京大学出版会 pp. 87-122)

Marr, D. (1982). *Vision*. The MIT Press.

(マー, D. 乾敏郎・安藤広志(翻訳)(1987). ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現 産業図書)

松為信雄(2007). 熟達 中島義明・安藤清志・子安増生・坂野雄二・繁増算男・立花政夫・箱田裕司(編) 心理学辞典 有斐閣 p.394.

三嶋博之 (2000). エコロジカル・マインド 日本放送出版協会.

Mitra, S. (2003). Postural costs of suprapostural task load. *Human Movement Science*, **22**, 253–270.

宮本弘之(1998). 見まねによる運動学習に関する研究 大阪大学大学院基礎工学研究科博士論文 (未公刊).

宮崎清孝・上野直樹 (2008) 視点 東京大学出版会

並木明夫(2013). 高速マニピュレーション. 日本ロボット学会誌, **31**, 358-363.

日本けん玉協会 (2003). 総合的な学習に生かせるけん玉あそび 小学館

日刊工業新聞(2014). 千葉大, 成功率 9 割のけん玉ロボを開発—視覚・触覚で剣の持ち方 補正 日刊工業新聞 2014 年 8 月 27 日 <<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720140818eaaa.html>>(2015 年 3 月 27 日)

野中哲士・西崎実穂・佐々木正人(2010). デッサンのダイナミクス. 認知科学, **17**, 691-712.

Oudejans, R. R., Michaels, C. F., Bakker, F. C., & Dolne, M.A. (1996). The relevance of action in perceiving affordances: perception of catchableness of fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**,

879-891.

Oullier, O., & Bardy, B.G., Stoffregen, T.A., & Bootsma, R.J. (2002). Postural coordination in looking and tracking tasks. *Human Movement Science*, **21**, 147-167.

大浦容子(1996). 熟達化 波多野誼余夫(編) 認知心理学 5 学習と発達 東京大学出版会 pp.11-36.

大浦容子・後藤克彦 (1994). 技の熟達と認知的所産—剣道の場合—. *教育心理学研究*, **42**, 1-10.

Peper, L., Bootsma, R.J., Mestre, D.R. and Bakker, F.C. (1994). Catching balls: How to get the hand at the right place at the right time? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **20**, 591- 612.

Pfeifer, R. & Bongard, J. (2007). *A New View of Intelligence*. Cambridge: MIT Press.

(ファイファー, R., & ボンガード, J. 石黒章夫・小林宏・細田耕(翻訳) (2010). 知能の原理—身体性に基づく構成論的アプローチ— 共立出版)

Pfeifer, R. & Scheier, C. (1999). *Understanding Intelligence*. Cambridge: MIT Press.

(ファイファー, R., & シャイアー, C. 石黒章夫・小林宏・細田耕(翻訳) (2001). 知の創成—身体性認知科学への招待 共立出版)

Polanyi, M. (1958). *Personal Knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.

(ポランニー, M. 長尾史郎(翻訳) (1985). 個人的知識—脱批判哲学をめざして ハーベスト社)

Polanyi, M. (1966). *The Tacit Dimension*. London: Routledge & Kegan Paul.

(ポランニー, M. 高橋 勇夫 (翻訳) (2003). 暗黙知の次元 筑摩書房)

Raghunathan, T., & Dong, Q. (2011). Analysis of variance from multiply imputed data sets. Unpublished manuscript. Survey Research Center, Institute for Social Research, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan. Retrieved from

<http://www-personal.umich.edu/~teraghu/Raghunathan-Dong.pdf>

Reed, E. S. (1988). Applying the theory of action systems to the study of motor skills.

In O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behaviour: The motor-action controversy*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, pp. 45-86.

Reed, E.S.(1996). *Encountering the World: Toward an Ecological Psychology*. Oxford University Press.

(リード, E. S. 細田直哉 (訳) 佐々木正人(監訳) (2000). アフォーダンスの心理学—生態心理学への道 新曜社)

Remelius, J. G., Hamill, J., & van Emmerik R. E. (2014). Prospective dynamic balance control during the swing phase of walking: stability boundaries and time-to-contact analysis. *Human Movement Science*, **36**, 227-245.

Rubin, D. B. (1987). *Multiple imputation for nonresponse in surveys*. New York, NY: Wiley.

Simon, H. A., & Gilmarin, K. (1973). A simulation of memory for chess positions. *Cognitive Psychology*, **5**, 29–56.

Shockley, K. (2005). Cross recurrence quantification of interpersonal postural activity.

In M. A. Riley & G. C. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 142-177). Retrieved June 16, 2010, from

<http://www.nsf.gov/sbe/bcs/pac/nmbs/nmbs.jsp>

Shockley, K., Baker, A. A., Richardson, M. J., & Fowler, C. A. (2007). Articulatory constraints on interpersonal postural coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **33**, 201-208.

Shockley, K., Santana, M. V., & Fowler, C. A. (2003). Mutual interpersonal postural

- constraints are involved in cooperative conversation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **29**, 326-332.
- Smith, J., Grealy, M., Pepping, G. J.(2014). Extrinsic tau-coupling and the regulation of interceptive reaching under varying task constraints. *Motor Control*, **18**, 347-67.
- Stoffregen, T. A., Pagulayan, R. J., Bardy, B. G., & Hettinger, L. J. (2000). Modulating postural control to facilitate visual performance. *Human Movement Science*, **19**, 203–220.
- Stoffregen, T. A., Smart, L. J., Bardy, B. G., & Pagulayan, R. J. (1999). Postural stabilisation of looking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 1641–1658.
- Stoffregen, T. A., Yang, C.-M., Giveans, M. R., Flanagan, M., & Bardy, B. G. (2009). Movement in the perception of an affordance for wheelchair locomotion. *Ecological Psychology*, **21**, 1-36.
- Todd, J. T. (1981). Visual Information About Moving Objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **7**, 795-810.
- Tuller, B., Fitch, H. L., & Turvey, M. T. (1982). The Bernstein perspective: II. The concept of muscle linkage or coordinative structure. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Understanding human motor control*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, **45**, 938-953.
- Turvey, M. T. (1996). Dynamic Touch. *American Psychologist*, **51**, 1134-1152.
- (三嶋博之 (訳)(2001). ダイナミック・タッチ. 佐々木正人・三嶋博之 (編) アフォー

ダンスの構想—知覚研究の生態心理学的デザイン 東京大学出版会)

植野研・古川康一(2009). 身体スキルとは 古川康一 (編著) 知の科学 スキルサイエンス入門—身体知の解明へのアプローチ オーム社 pp.1-18.

Van Santvoord, A. A. M., & Beek, P. J. (1994). Phasing and the pick-up of optical information in cascade juggling. *Ecological Psychology*, **6**, 239-263.

Francisco J. Varela, F. J., Rosch, E., & Thompson, E. (1992). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. The MIT Press.

(ヴァレラ, F., トンプソン, E., & ロッシュ, E. 田中靖夫 (翻訳) (2001). 身体化された心—仏教思想からのエナクティブ・アプローチ 工作舎)

Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, **113**, 358-389.

Webber, C.L., & Zbilut, J.P., Jr. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. In M. A. Riley & G. C. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, (pp. 26-94).

Retrieved June 16, 2010, from <http://www.nsf.gov/sbe/bcs/pac/nmbs/nmbs.jsp>