

論文の内容の要旨

論文題目：Timing control mechanism in rapid interception actions

(打撃動作におけるタイミング制御メカニズム)

氏名：井尻 哲也

1. 研究の背景

野球やクリケットの打撃動作は、非常に短い時間のうちに素速く行われる(rapid interceptive action). 投手が投じるボールの速度は 140 km/h を越え、約 0.4~0.6 秒で打撃点まで到達する. その上、投じられるボールの速度はばらつきが大きく、打者は打撃到達時点までの時間差を、動きだしのタイミングと動作速度を制御して、極めて短い時間の中に調節する必要がある. この厳しい時間的の中で高速のボールを捉えるタイミング制御がいかなる神経機序の基になされているのか? この問いに対する神経科学的な答えは得られていない.

打撃動作におけるタイミング制御におけるストラテジーは、大きく分けて Preprogrammed control と Continuous control の 2 つが提唱されている (Tresilian, 2005; Zago, McIntyre, Senot, & Lacquaniti, 2009). 前者は、視覚情報または事前知識をもとに運動指令を事前に準備し、運動の生成タイミングを主に制御する方略である. この戦略を採用した場合、運動はバリスティックで修正を伴わないものになり、複数の先行研究は、当方略を運動熟練者に特徴的な動作であると提唱している (Tyldesley & Whiting, 1975). 一方で後者の戦略は、事前に準備された運動指令に基づかず、継続的に得られる視覚情報から運動指令を生成し続ける方略である. 後者の戦略を採用した場合は、運動は修正的なものになり、動く物体の速度に応じて運動速度が変化することが知られている (Brenner &

Smeets, 2011). 当戦略も，継続的な修正を行うことで時間的正確性を高めることが分かっており，2つの制御戦略が素速い打撃動作の正確性を高めるために，どのように採用されているかは未だ解明されていない。

また，動作の開始タイミング決定するプロセスと，生成された運動を達成するプロセスには，共に中枢神経系由来の遅延が伴うため，2つのプロセスを打撃動作の時間内で効果的に実行するためには十分な時間がないことが指摘されている。

そこで本論文では，研究1において，タイミングの制御戦略の個人差と時間的正確性の関係を検証した。また，動作の修正が有効に行われているかを検討し，そのメカニズムを考察した。研究2において，ヒトの中枢神経が **Rapid interceptive action** における厳しい時間的制約を克服し，運動開始タイミングを制御するための神経生理学的な機序を検討した。

2. 研究 1: 素速い打撃動作におけるタイミング制御方略の個人差と時間的正確性

被験者 (n = 26) は，PC モニター上で動くボールを，肘関節の屈伸展で制御したバットで打つタスクを行い，肘の角度変化と上腕三頭筋からの筋電位を記録した。ボールの **Time-to-contact** は，実験1 (**Paired-speed** 条件) では 670 ms (**Slow**) と 540 ms (**Medium**) がランダムに投げられ，被験者は，運動開始タイミングと運動時間を調整して 130 ms の **TTC** の差を補償することを求められた。結果として，被験者の採用した制御方略は，修正に頼らず，運動開始タイミングの制御を重視する群 (**Onset control group**: n = 11) と，両速度のターゲットに対して，同じタイミングで動作を開始した後に修正に頼る群 (**Duration control group**: n = 16) に二極化した。

実験2では，さらに厳しい時間的制約を課し (**Medium**: 540 ms, **Fast**: 410 ms)，時間的制約の制御方略に与える影響を検討した。その結果，**Duration control group** は実験1と同じ制御方略を維持したが，**Onset control group** 内の多くの被験者は，同じ戦略を維持できず，**Duration control** へと転換した。さらに，両実験において，運動開始タイミングを主に制御できる被験者が時間的正確性が高いことが示された。

実験3 (**Single-speed condition**)では，速度識別プロセスの有無が制御戦略と時

間的正確性に与える影響を検討するために、**Slow, Medium, Fast** のそれぞれを別のブロックにおいて単独で被験者に打たせた。その結果、速度識別の必要がない状況下においても、実験 1, 2 で修正的な戦略を採用した被験者は、動作速度がターゲットの速度に影響されることが分かった。一方で **Onset control** に頼った被験者は、ターゲットの速度に動作速度が影響されなかった。このような制御方略の違いと時間的正確の関連は、実験 1, 2 と同様には観察されず、速度識別のプロセスの有無が戦略の違いによる正確性の差を生み出す要因になっていることが分かった。また、動作の修正は筋活動で動作開始から約 **70 ms** 後に生じていることが分かり、運動開始前にエラーの検出、および修正的な運動指令が生成されていることが示唆された。

3. 研究 2: 運動開始タイミングの制御における厳しい時間的制約を克服するための制御メカニズム

研究 2 では 10 名の被験者が、研究 1 と同様のタスクを PC モニター上で行った。Single-speed (SS) 条件ではボールの **Time-to-contact** は常に **800 ms** であり、Paired-speed (PS) 条件では **500 ms (Fast)** と **800 ms (Slow)** がランダムに投げられた。両条件の **Slow** の 20% の試行において、約 **123dB** の非常に大きい音刺激 (**SAS: Startling acoustic stimulation**) を投球の **150ms** 後に提示した。この音刺激は、皮質下の橋網様体の神経細胞を興奮させ、**Startle reflex** (驚愕反射) を生じさせる。同時に、被験者が運動を開始する直前であれば、計画している随意運動を音刺激の提示から約 **70ms** の潜時で誘発できる (**StartReact (Valls-sol, Rothwell, Goulart, Cossu, & Mu, 1999)**)。この **StartReact** は橋網様体の神経細胞が視床一皮質間の運動関連回路に上行性のシグナルを送ることで、皮質内で計画されている運動指令をトリガーすることによって生じると考えられている (**Carlsen, Maslovat, & Franks, 2012**)。本実験ではこの手法を用いて、運動準備期における皮質下の運動関連回路の興奮性の変調を探索した。結果として、**SAS** は両条件で、同じ **Slow-speed** の試行で提示したにも関わらず、**PS** 条件 (**83.3 ± 6.8 %**) において、**SS** 条件 (**19.6 ± 20.2 %**) よりも有意に高い割合で上腕三頭筋の筋活動を早期に誘発した。両条件の違いは、潜在的に予測されている **Fast-speed trial** の有無のみであるので、**PS** 条件において観察された興奮性の増

大は、Fast-speed のタイミングに対する興奮性の Pre-activation であると解釈できる。すなわち、ヒトは予測される最も速いターゲットに対して、運動を開始するための皮質下運動関連回路の興奮性を閾値下で高めることで、運動を開始するための意思決定プロセスを短縮していると考えられる。また、Preprogrammed control の実行においても、その運動生成タイミングの決定プロセスは、feedback visual information を活用した継続的かつ修正的なものであり、Preprogrammed control と Continuous control は択一的に選択されるものではないことが示唆された。

4. まとめ

本論文では、打撃動作におけるタイミング制御メカニズムについて、Preprogrammed control と Continuous control という 2 つの観点から、大きく分けて 2 つの研究を行った。その主な知見は以下のようにまとめられる。研究 1 では、2 つの制御戦略の採用において、明確な個人差があり、Preprogrammed control を主に採用する被験者の時間的正確が高いことが分かった。また、200~300 ms の動作時間で実行される素早い動作においても動作の修正が可能であることが示された。研究 2 では、大脳基底核、視床を含む皮質下の運動関連回路の閾値下での興奮性調節が、運動開始タイミングのせいぎよにおける厳しい時間的制約の克服に貢献していることが示唆された。本研究の一連の結果から、日常の時間的制約下では顕在化しない、ヒトの神経系が厳しい時間的制約下で行う運動制御メカニズムの一端が示された。本研究で示された、打撃動作に関する認知的なプロセスは野球やクリケットなどの競技能力向上のために重要な意義を持つ。