

論文の内容の要旨

投動作における投射物の 速度生成・調節メカニズム

Velocity generation and adjustment mechanisms of projectile in throwing motion

木村 新

1 章：序論

野球やハンドボールをはじめ、多くのスポーツ場面で投動作は重要な動作となっている。このようなスポーツ場面における投動作では、投射物の速度を大きくすることと、投射物の方向を精緻に調節することで到達位置を安定させることが要求される。本博士論文では、投射物の速度生成および調節メカニズムについて検討した。

2 章：投射物の速度生成メカニズム

投射物の速度が大きいということは、投射物が大きな力学的エネルギーを持っているということの意味する。したがって、投射物の速度を大きくするためには身体で大きな力学的エネルギーを生み出した後、身体の末端部である手部へその力学的エネルギーを効率よく伝達する必要がある。これまで投動作に関する研究は行われてきたものの、考察対象が主に上肢のみに限られていた (Dillman et al., 1993; Fleisig et al., 1999; Fleisig et al., 1995)。しかしながら、上肢はその解剖学的な特徴から下肢や体幹と比べると付着している筋が小さいため、発揮できる力も小さい。それゆえ、投動作時に上肢のみで発生できる力学的エネルギーも小さいと考えられる。したがって、身体で大きな力学的エネルギーを生み出すためには上肢のみではなく下肢や体幹を使う必要があり、発生したエネルギーを効率よく伝達することで投射物の速度を大きくすることができる。そこで、まず野球の投球動作を対象とし、速度生成メカニズムについて力学的エネルギーの観点から検討した。

その結果、主に軸脚の股関節外旋トルクと踏み出し脚の股関節内転トルクが骨盤の上下軸まわり

の力学的エネルギーを増大させていた (外旋トルクの仕事量 : 0.44 ± 0.11 J/kg、内転トルクの仕事量 : 0.48 ± 0.14 J/kg)。そして、軸脚の股関節外旋トルクは主に力学的エネルギーを大腿部から骨盤へ伝達しており (伝達量 : 0.48 ± 0.12 J/kg)、踏み出し脚の股関節内転トルクは力学的エネルギーの発生および伝達をしていた (発生量 : 0.18 ± 0.08 J/kg、伝達量 : 0.20 ± 0.07 J/kg)。つまり、これらのトルクが骨盤の上下軸まわりの力学的エネルギーを増大させる上で重要であるといえる。そして、体幹内部の腰部と胸部の仮想関節で発揮された捻転トルクが骨盤から上部体幹 (上胴) へ力学的エネルギーを伝達することで、上胴の力学的エネルギーが増大していた (腰部仮想関節の伝達量 : 1.52 ± 0.42 J/kg、胸部仮想関節の伝達量 : 1.25 ± 0.33 J/kg)。このことは、体幹を捻じることによって、つまり力学的エネルギーを発生することによって上胴の角速度が増大しているわけではないことを示している。言い換えると、下肢の力発揮によって骨盤の角速度が増大した後に、それに伴い上胴の角速度も増大していることを示している。

これまでの研究によって、投球腕各関節で発揮される相互依存トルクが上胴の力学的エネルギーを手部へ伝達していることが示されていることから (Naito et al., 2011)、投球動作時には下肢が主に力学的エネルギーを発生し、体幹は関節トルクによって、投球腕は相互依存トルクによってエネルギーを伝達していると結論付けることができる。

3章 : 投射物の速度調節メカニズム

投動作時には、投射物の速度の向きや大きさのわずかな誤差が到達位置に大きな誤差を生み出す。そのため、目標とする場所へ正確に投げるためには、投射物の速度の向きと大きさを精緻に調節する必要がある。その際、各関節の動作の再現性を高めることで投射物の到達位置の正確性向上が期待できる。しかしながら、熟練者であったとしても関節の動作の変動は生じている (Bernstein, 1967)。では、熟練者はどのようにして投射物の到達位置を安定させているのか。この問題を解決するための糸口となるのが、関節間の協調関係である。つまり、熟練者では投射物の到達位置を一定にするような関係性を維持しながら関節の動作同士が共変動している。これにより、個々の関節の動作にはばらつきが生じていながらも、投射物の到達位置は安定している。

関節間の協調関係に着目した研究はこれまでも行われており、関節間に協調関係が存在するかどうかを検討されてきた (Müller & Sternad, 2003)。本研究ではこれに加え、個々の関節間の共変動にも焦点を当てながら協調関係を検討していく。それは、個々の関節間の共変動に焦点を当てることで、どの関節の動作が結果のばらつきを抑える上で重要なのかを理解することが可能になるからである。

そこで、ここでは座位での投球動作を対象に、ボールの到達位置を安定させる上でどの関節の動作同士の共変動が協調的な関係にあるのかを検討した。投球動作において上下方向のボール到達位置は、ボールリリース時における上下方向の手部速度の大きさに応じて変化する (Hore et al., 1996)。そのため、狙った場所へ正確に投げるためには、ボールリリース時における上下方向の手部速度の大きさを精緻に調節する必要がある。したがって、手部速度を調節する上でどの関節の動作同士の共変動が協調的な関係にあるのかについて検討した。

その結果、最大努力で投球を行わせた場合、肩関節の内外旋軸まわりの角度と他の動作との共変動が手部速度のばらつきを抑える上で協調的な関係にあったことが示された。一方で、手部速度のばらつきを抑えることに対して影響に小さい関節の動作同士の共変動もみられた。このことは、全

ての関節の動作同士の共変動が手部速度のばらつきを抑えることに対して協調的に働いているとは限らないことを示している。また、異なる投球速度 (Fast 条件、Medium 条件、Slow 条件) で投球を行わせた結果、Fast 条件では肩関節の内外旋軸まわりの角度と他の動作との共変動が、Medium 条件では肩関節の水平屈曲伸展軸まわりの角速度と他の動作との共変動が手部速度のばらつきを抑える上で協調的な関係にあった。一方で、Slow 条件ではどの関節が独立にふるまったとしても、手部速度のばらつきに与える影響は小さかった。これらの結果は、投球速度に応じて手部速度のばらつきを抑える働きを持つ関節の動作同士の共変動は異なることを示している。

4 章：総括論議

野球の投球動作やテニスのサーブ動作のような身体の末端部を加速させるスポーツ動作においては、おおよそ身体の中心部から末端部の順に身体各部位の速度が増大していく。このようなスポーツ動作において、下肢や体幹は末端部の速度を増大させる上で主に力学的エネルギーを発生しており、上肢は主に力学的エネルギーを伝達していることが報告されてきた (Martin et al., 2014; 島田ら、2004)。その中で、本博士論文では野球の投球動作において、下肢では軸脚の股関節外旋トルクが力学的エネルギーを伝達し (伝達量 : 0.48 ± 0.12 J/kg)、踏み出し脚の股関節内転トルクが力学的エネルギーを発生および伝達していたことを示した (発生量 : 0.18 ± 0.08 J/kg、伝達量 : 0.20 ± 0.07 J/kg)。また体幹では、捻転トルクが力学的エネルギーを伝達していたことを示した (腰部仮想関節の伝達量 : 1.52 ± 0.42 J/kg、胸部仮想関節の伝達量 : 1.25 ± 0.33 J/kg)。加えて、上肢では相互依存トルクが力学的エネルギーを伝達していることがこれまでの研究によって示されている (Naito et al., 2011)。

一方で、身体の末端部を加速させるスポーツ動作では、ボールリリースおよびインパクト直前において末端部に近い関節の動作や筋が投射物の到達位置のばらつきを抑えている、言い換えると投射物の速度のばらつきを調節していることが報告されている (Hirashima et al., 2002; Sakurai & Ohtsuki, 2000)。つまり、このような動作においては相対的に大きな仕事を行うことができる下肢と比べ、上肢は投射物の速度のばらつきを調節することに寄与していると考えられる。したがって、野球の投球動作において、上肢は手部速度を生成する上で力学的エネルギーを伝達していることに加え、手部速度の調節にも寄与していると考えられる。その中で本博士論文では、肩関節の内外旋軸まわりの角度や水平屈曲伸展軸まわりの角速度が手部速度を調節する上で重要な動作であることを示した。以上をまとめると、本博士論文によって投球動作では下肢で発生した力学的エネルギーを体幹および上肢が伝達することで手部速度を生成すると共に、上肢の各関節の動作同士が協調的に共変動することで手部速度を調節していることが明らかとなった。