

論文の内容の要旨

Biomechanics of fingers in baseball throwing

(野球の投球動作における手指のバイオメカニクス研究)

柴田 翔平

【背景】

ダイナミックな上手投げによる投球動作は、スポーツ動作において最も典型的な投法であり、人間のみ遂行可能な動作である。特に野球の投手による投球動作は、高いボール速度と正確なボールリリースを必要とするため、複雑な全身の協調動作であると考えられる。投球動作のメカニズム解明のために、キネマティクスやキネティクスの観点から、投球動作時の肩・肘・前腕・手首に着目した力学的分析がなされてきた。しかし、投球動作時の手指のトルクやパワー、仕事に関しては分析がなされていない。Hore et al. (1996) は、手指のリリースタイミングの遅れが、ボールの軌道に大きな影響を与えると報告している。また、投手は、直球だけでなく、様々な変化球を投球する。打者からボールリリース以前に球種を判別されないようにするため、投手は、手指以外の全セグメントの動作を各球種で統一することが理想とされる。そのため、野球の投球動作において手指によるトルク発揮は、正確なボールリリースや様々な回転特性を有する変化球の投げ分けを実現する上で重要な役割を果たすことが予想される。そこで、本研究では、野球の投球動作における手指のMP関節トルクの制御メカニズムを明らかにすることを目的とした。研究1ではまず、手指を考慮したリンクセグメントモデルを開発し、その妥当性を評価した。研究2、研究3では投球動作における手指の一般的な機能に焦点を当て、様々なボール速度における投球動作時の手指のキネティクス解析を行った。研究4では、実際の野球の投球動作を対象に、直球とカーブ投球時の手指のキネティクス解析を行い、複数の球種を投げ分ける際の手指の制御メカ

ニズムについて検討した。

【研究 1】 投球動作における手指モデルの開発

従来のモデルでは手指の運動が考慮されておらず、投球動作における手指の MP 関節トルクの機能は明らかになっていない。そこで、研究 1 では (1) 投球動作における手指の MP 関節トルクの役割を明らかにするために、手指を考慮したリンクセグメントモデルを開発すること (2) 従来のモデルと手指セグメントを考慮した手指モデル間での手関節トルクの差を明らかにすることを目的とした。手指モデルを用いて、(1) 手指の MP 関節トルクが算出可能であること (2) 手関節の屈曲・伸展トルクが従来モデルより正確に算出可能であることが明らかとなった。手指モデルによる MP 関節トルクの信頼性は 83 % であった。誤差の主要因はボール加速度であった (-17 %)。また、手指モデルによる手関節の屈曲・伸展トルクの信頼性は従来モデルより 14% 向上した。従来モデルによる誤差の主要因は、ボール位置の近似であった。この結果は、ボール位置を考慮することで従来モデルの信頼性を向上させることが可能であることを示唆している。

【研究 2】 投球動作における手首トルクと手指トルク間における中枢神経系のタイミング制御

投球動作では、近位から遠位セグメントへの連続的な活動 (P-D sequence) が遠位セグメントの効果的な速度生成に必要であると考えられている (Pappas et al., 1985; Feltner, 1989)。しかし、手首から手指へ P-D sequence が発生するかは検証されていない。そこで、研究 2 では、手首トルクと手指トルク間における中枢神経系のタイミング制御メカニズムを検討した。手関節トルクと MP 関節トルク間の最大相互相関係数は非常に高く ($r = 0.85 \pm 0.10$)、その遅延時間は非常に小さかった ($t = 0.36 \pm 3.02$ ms)。手首トルクと手指トルク間の僅かなタイミングの遅れは、ボール軌道に大きな影響を与える。これらの結果から、リリースタイミングを安定化させるために、中枢神経系はフィードフォワード制御によって、手首トルクと手指トルクを同期させていると予想される。

【研究 3】 異なるボール速度での投球動作における手指のトルク制御

野球では、投手は正確性を保ちながら様々なボール速度で投球を行う。しかし、研究 2 で分析されたボール速度は遅く (7.8 ± 0.7 m/s)、速度範囲も制限されていた。ボール速度が大きい投球動作では、より大きな手指の把持力が生成されることが先行研究により報告されている (Hore et al., 2001)。そこで、研究 3 では、(1) 異なるボール速度での手首及び手指のバイオメカニシク的役割を明らかにすること (2) 手指の最大随意屈曲トルクに対する投球動作における屈曲トルクの割合を評価することを目的とした。多重比較検定の結果、手首の屈曲・伸展トルクとその仕事は、ボール速度の調整に寄与することが示された。また、手指のピークトルクはボール速度に応じて増加したが、仕事は一定値を示した。これらの結果より、手指の屈曲トルクと仕事は、ボールの把持と正確なボールリリースに寄与することが推察された。また、手指の最大随意屈曲トルクに対する投球動作における屈曲トルクの割合は $-6.7 \pm 18.4 \% \sim 58.3 \pm 18.7 \%$ であった。標的

に対する投球動作時の手指の屈曲トルクはトルク-角度関係では至適角度付近で、トルク-角速度関係では最大等尺性トルク付近で発揮されていた。これらの結果から、トルク発揮における最適な領域での手指トルクの活動は、ボールからの反作用の力に対抗するために必要とされる大きな屈曲トルクを生成するために効果的であると考えられる。

【研究 4】直球とカーブ投球における手指のバイオメカニクスの役割

野球の投手は、打者を打ち取るために直球だけでなく様々な変化球を投じる。特にカーブは代表的な変化球の1つであるが、カーブ投球時の手指のキネティクス解析はなされておらず、複数の球種の投げ分けを実現する手指動作の制御メカニズムは明らかではない。そこで、研究 4 では実際の野球・投球動作に着目し、(1) 直球及びカーブの投げ分けを実現する手指の制御メカニズムを検討すること (2) 野球投球時のボール回転数を生成する要素を検証することを目的とした。直球投球時における手指のピーク屈曲角速度はカーブと比較し、有意に大きな値を示した。また、カーブ投球時における手指のピーク内外転トルクは直球と比較し、有意に大きな値を示した。これらの結果より、直球はリリース直前の手指の屈曲運動によって発生し、カーブはリリース直前の手指の内転運動によって発生することが明らかとなった。直球において、同じボール速度で回転数の異なる 6 名の被験者を比較すると、回転数の多い投手は手指のピーク屈曲トルクやパワーが小さな値を示していた。一方、カーブでは、同じボール速度で回転数の異なる 4 名の被験者を比較すると、回転数の多い投手は手指のピーク屈曲トルクやパワーが大きな値を示していた。これらの結果から、直球では手指の屈曲動作のボール回転数生成に対する貢献は少なく、カーブ投球においてその貢献が大きいことが示唆された。