

審査の結果の要旨

論文提出者氏名：柴田 翔平

野球の投手による投球動作は、球種を打者に見破られないようにするため、複数の球種を同じフォームで投球することが理想とされる。そのため、ボールと接触する唯一のセグメントである手指の制御が、様々なボールの投げ分けを実現する上で重要な要素であると考えられる。先行研究では、直球投球時における手指に作用する力が計測されているが、複数球種の投げ分けにおける手指トルクの制御に関する分析はなされていない。投球動作における手指トルクの制御メカニズムに関する知見は、指導者や投手が複数球種の投げ分けのスキルを習得するために有益な情報であると考えられる。そこで本研究では、標的を狙った投球動作と実際の投手による投球動作を対象に、手指トルク・パワーや手首トルク・パワーの分析を中心とし、次の4研究を通してバイオメカニカルな手指トルクの制御メカニズムを解明することを目的としている。その内容は、以下のようにまとめられる。

【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でのタイミング制御

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、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クスの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によって発生し、カーブはリリース直前の手指の内転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トルク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。

柴田翔平君の論文は、ヒトに特有な動きである上手投げ動作を対象に、これまで研究されてこなかったリリース時の手指トルクを定量するモデルを開発した。そのモデルを基に、タイミング制御、異なるボール速度でのトルク制御、そして直球とカーブ投球におけるバイオメカニカルな役割を明らかにした。これらの実験研究から得られた知見は、ボール投げの指導法の基となる客観的な機序を明らかにしたものであり、身体運動科学の分野における意義は非常に大きい。したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。