

中京大学博士審査学位論文

大学院スポーツ科学研究科

男子やり投げにおける高い前および上方向のやり速度

獲得に関するバイオメカニクス

Biomechanics of high forward and upward javelin

velocity acquisition in male javelin throw

2024年3月19日 学位授与

中京大学大学院 スポーツ科学研究科 スポーツ科学専攻

牧野 瑞輝

目次

第1章	序論	1
1.1	研究小史	1
1.1.1	はじめに	1
1.1.2	リリースパラメータに関する研究	1
1.1.3	投てき動作に関する研究	2
1.1.4	やり投げに関する研究における問題点	6
1.2	本研究の目的および課題	9
第2章	前および上方向のリリース速度と関係するキネマティクスの要因	11
2.1	目的	11
2.2	方法	11
2.2.1	対象者	11
2.2.2	データ収集および処理	11
2.2.3	算出項目	12
2.2.4	統計処理	15
2.3	結果	16
2.4	考察	23
2.4.1	前および上方向のリリース速度	23
2.4.2	前および上方向のリリース速度の両者と関係する要因	24
2.4.3	前方向のリリース速度と関係する要因	25
2.4.4	上方向のリリース速度と関係する要因	26
2.4.5	前および上方向のリリース速度との間で相反する要因	27
2.5	概括	29

第3章	前および上方向のやり速度に対するキネマティクスの貢献.....	30
3.1	目的.....	30
3.2	方法.....	30
3.2.1	対象者.....	30
3.2.2	データ収集および処理.....	30
3.2.3	算出項目.....	30
3.2.4	統計処理.....	33
3.3	結果.....	34
3.4	考察.....	39
3.4.1	前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方.....	39
3.4.2	上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方.....	40
3.5	概括.....	46
第4章	総合考察.....	47
第5章	総括.....	59
参考文献	61

本論文は以下の 2 編の論文に基づいて構成される。

1. Makino, M. and Tauchi, K. (2022) Kinematic factors related to forward and vertical release velocity in male javelin throwers. *International Journal of Sport and Health Science*, 20: 249–259.
2. 牧野瑞輝・田内健二 (2023) 男子やり投げ競技者における前および鉛直方向のやり速度に対するキネマティック的貢献. *陸上競技学会誌*, 21: 13–22.

第1章 序論

1.1 研究小史

1.1.1 はじめに

やり投げは、陸上競技における投てき種目のうちのひとつである。やり投げでは、男子の場合で質量 800g 以上、長さ 2.6–2.7m、女子の場合で質量 600g 以上、長さ 2.2–2.3m に規定された投てき物を投げ、その飛距離が競われる。また、やりの形状は、野球やハンドボールなどの球技種目で用いられるボールよりも細長い棒状をしていることから、飛行中に空気抵抗を受けやすい特徴を有している。こうした背景から、やりの飛距離は、主に投射された時点における“初速度”、“投射角”、“投射高”、および投射後の空力学的要因によって決定される (Hay, 1993)。従って、やり投げに関する先行研究では、リリース時のやりの諸条件（これらの要因を総称してリリースパラメータとする）と飛距離の関係について多く検討されてきた。

1.1.2 リリースパラメータに関する研究

やり投げに関する先行研究において、リリースパラメータには、主にやりの初速度、投射角、投射高、姿勢角、迎え角が含まれる。そのなかでも、多くの先行研究では、やりの初速度（リリース速度）と記録との間で強い正の相関関係が認められており (Komi and Mero, 1985; Murakami et al., 2006; 瀧川ら, 2020)、その他の要因については、記録との有意な相関関係は報告されていない。これらのことは、やり投げにおいて優れた記録を達成するためには、高いリリース速度を獲得することが特に重要な要因であることを示唆するものである。

また、記録との関係が弱いとされている投射角および迎え角については、大小のいずれかに極大な値を示す場合には、パフォーマンスの低下に繋がると考えられている。そのため、

投射角および迎え角については、記録との相関関係だけでなく、至適な値についても検討されている。そのなかでも、リリース速度が 20 から 35m/s の範囲において、飛距離が最大となる投射角度をコンピュータシミュレーションによって検討した研究では、適切な投射角がおよそ 30° 付近であることが報告されている (Hubbard and Alaways, 1987)。加えて、前田ら (1997) は、選手の動きを考慮に入れた場合における適切な投射角度がおよそ 33° であることを報告しているものの、この値は選手間での変動が大きく、全ての選手に共通する最適な投射角を定めるのは難しいと述べている。さらに、矢状面における迎え角については、コンピュータシミュレーション上ではリリース速度が 20 から 35m/s の範囲では、0 から -2.5° (Hubbard and Alaways, 1987)、リリース速度が 30.18m/s の場合には、-2.8° (Best and Bartlett, 1988) が至適であると算出されている。これらのコンピュータシミュレーション研究によって検討された指標はいずれも矢状面内の迎え角に限られるが、水平面内の迎え角についても、記録の優れた選手では劣る選手よりも絶対値が 0° に近いことが報告されている (Bartlett et al., 1996)。

上述してきたことをまとめると、やりをより遠くに投げるためには、投射角を 30° 付近、および矢状面内および水平面内の迎え角を 0° 付近に調整したうえで、より高いリリース速度を獲得する必要があると考えられる。こうした背景から、やり投げに関する研究では、リリースパラメータに関する研究のほかにも、高いリリース速度の獲得に係る動作についてバイオメカニクスの観点から多く検討されてきた。

1.1.3 投てき動作に関する研究

やり投げでは一般的に、助走を行った後、やりを後方に引いた状態で走るクロスステップを経て、最終的にやりが投てきされる (図 1)。これら一連の動作のうち、やり投げに関する先行研究では、最後の後足接地時 (右投げ選手の場合、右足接地時) 以降の動作について焦点を当てて、高いリリース速度の獲得に係る動作が検討されてきた (以降、本論文で

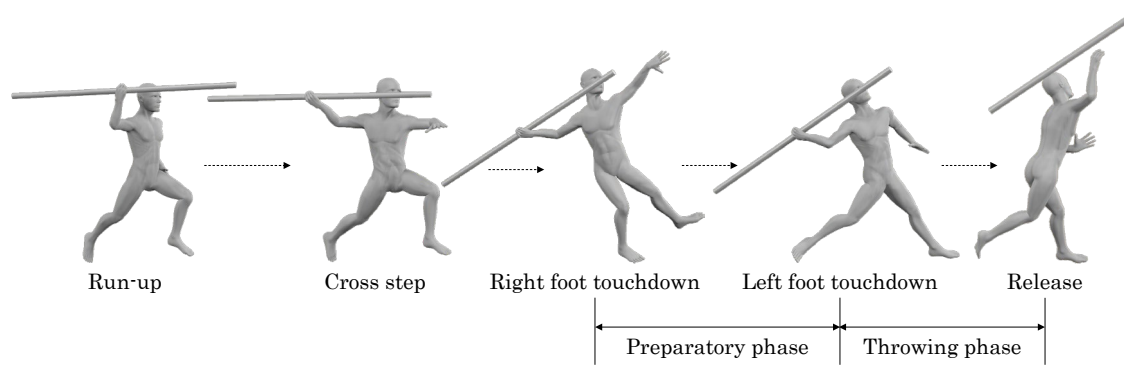


図1 やり投げにおける一連の動作

は右投げ選手を想定して記述する)。従って、本論文では一連の投動作のうち、最後の右足接地時から左足接地時までを準備局面、左足接地時からリリース時までを投てき局面とし、先行研究において報告されてきた高いリリース速度の獲得と関係する動作を局面ごとに整理する。

(1) 準備局面における投てき動作

やり投げでは記録の優れた者ほど、最終的な右足接地時および左足接地時における身体重心速度が高かったことが報告されている (Bartlett et al., 1996; Murakami et al., 2006; 田内ら, 2012; Murakami et al., 2017)。とりわけ、田内ら (2012) は、記録の優劣と関係する各種動作要因の重要度を、重回帰分析によって順位付けしたところ、重要度の最も高い要因は、最後の左足接地時における身体重心速度であったことを報告している。このことから、投てき種目のなかで唯一、助走が許されているやり投げでは、助走を速くし、準備局面における身体重心速度を高くすることが高いパフォーマンスに極めて重要な要因であることが推察される。

また、最後の左足接地時における身体重心速度を高めるためには、助走を速く走ることのほかにも、準備局面における減速を小さくするという観点も必要となる。野友ら (1998) は、記録の優れた者は劣った者と比較して、準備局面での体幹の後傾角度が小さかったことを報告している。このことについて、Bartonietz (2000) は、右足接地時における体幹の後傾角度を大きくすることは、接地足と身体重心との水平距離を大きくするため、身体重心速度を減速させる要因となると推察している。また、Tauchi et al. (2009) は、2007年に行われた世界陸上競技選手権における上位入賞選手は下位入賞選手よりも準備局面における右膝が屈曲位で推移していたことを報告している。田内 (2009) は、準備局面において右膝を屈曲位で推移させることが、右腰をスムーズに前方へ移動させることを可能にするため、身体重心速度の減速を防ぐ役割を持つことを示唆している。さらに、Murakami et al. (2017)

は、記録の優れた者は劣った者よりも準備局面における右膝の屈曲および伸展角速度の最大値が低かったことを報告している。これらのことから、準備局面における身体重心速度の減速を防ぐためには、体幹の後傾角度を小さくするとともに、右膝の角度を一定に保ちながら左足を接地することが重要であると考えられる。

(2) 投てき局面における投てき動作

次に、左足接地時では、パフォーマンスの優れたやり投げ選手ほど左膝がより伸展位であったことが報告されている (Bartlett et al., 1996; 野友ら, 1998; 村上と伊藤, 2003)。やり投げにおいて左膝を伸展位にすることは、助走で得た全身の力学的エネルギーをやりへと効果的に伝達させるための役割を持つと考えられている (Bartlett and Best, 1988; Lysoń-Ukłańska et al., 2021; Morriss and Bartlett, 1996)。また、村上と伊藤 (2003) は、リリース時における左膝の伸展角度と体幹の前傾角速度との間に有意な正の相関関係が認められたことを報告している。これらのことから、やり投げパフォーマンスの優れた者では、より高い重心速度を持った状態で左足を接地するとともに、左膝をより伸展位にすることで、体幹の並進運動を回転運動へと効率的に変換していたことが推察される。

さらに、やり投げでは左足接地後において、野球やハンドボールなどのスポーツにもみられるような、オーバーハンドによる投動作が行われる。投動作を対象とした研究では、投てき腕における各関節の最大速度、あるいは部分の力学的エネルギーの最大値が身体の中心部から末端部の順に出現する現象 (運動連鎖) が確認されている (Jöris et al., 1985; Whiting et al., 1991; 島田ら, 2004)。このことは、投動作では、体幹の力学的エネルギーを上腕、前腕、手へと順次伝達させることで、投てき物の速度が獲得されていることを示唆するものである (Chu et al., 2016)。また、やり投げでは、記録の優れた者は劣った者と比較して、投てき腕における肩、肘、およびやりの最大速度が高かったことが報告されている (Whiting et al., 1991)。この結果は、やり投げにおいて高いリリース速度を獲得するためには、身体

の中心部から末端部にかけてより大きな力学的エネルギーを伝達させることが重要な要因であることを示唆するものである。

そのほかにも、記録の優れた者は、最後の左足接地時において、右腰とやりのグリップとの水平距離が大きかったことが報告されている (Bartlett et al., 1996)。このことは、やりを投てき方向に対して大きく後方に位置させておくことが、より長い距離にわたってやりを力を加えられる点において有利であることを示唆するものである。また、Mero et al. (1994) は、左足接地時にやりを投てき方向に対して大きく後方に位置させておくことが、右肩周りの筋群における伸長-短縮サイクル (SSC) をより効果的に利用しやすくなる点においても有利であると指摘している。さらに、Makino et al. (2020) は、記録の優れた者は劣った者と比較して、左足接地時における右肩の水平外転角度が大きかったこと、田内ら (2012) は、記録の優れた者ほど左足接地時における腕角度 (水平面内における右肩と左肩を結んだ線分と右肩とグリップを結んだ線分とのなす角度) が大きかったことを報告している。これらのことは、やりを体幹に対してより後方に位置させた姿位から投動作を行うことが、高いパフォーマンスと関係する可能性を示しており、Mero et al. (1994) が指摘したように、右肩周りの筋群における SSC をより効果的に利用しやすい姿位をとっていたことが推察される。

1.1.4 やり投げに関する研究における問題点

ここまで述べてきたことから、投てき動作に関する先行研究を集約すると、高いリリース速度の獲得に関するバイオメカニクスの要因はある程度明らかにされていることが伺える。また、上述してきた高いリリース速度の獲得と関係する動作を報告した研究では、一連の投てき動作のうち、右足接地時や左足接地時、リリース時といった特定の時点の値、あるいは最大値や最小値などの断片的なデータを報告したものが多い。やり投げをはじめとする投動作では、全身の関節運動が相互に影響しながら末端部の速度が高まることから、高い

リリース速度と関係する動作は、各部位ごとに時々刻々と変化していく。この考えに基づくと、右足接地時や左足接地時、最大値、最小値などの断片的なデータだけでは、高いリリース速度の獲得に関係する動作を見逃している可能性がある。この問題を解決するためには、種々のバイオメカニクスデータを時系列で捉えて、高いリリース速度の獲得と関係する動作を検討する必要があると考えられるが、このことを試みた研究は僅かである。(問題点1)

また、本章においても指摘したように、やりをより遠くに投げるためには、リリース速度を高めるだけでなく、 30° 付近の適切な投射角で投てきする必要がある。やり投げにおける投射角は、リリース速度のベクトルにおける前方成分と上方成分との比によって決定される。このことから、やり投げにおいてより優れた記録を達成するためには、単に合成のリリース速度を高めるのではなく、前および上方向のリリース速度の両者を同時に高め、適切な投射角を維持する必要があると考えられる。野球に関する先行研究では、主に斜め上方向にボールを投げる遠投動作と主に前方向にボールを投げるピッチング動作の間では、投動作が部分的に異なることが報告されている。例えば、遠投動作ではピッチング動作と比較して、右肩の外旋角度および右肘の伸展角度の最大値が大きいこと (Fleisig et al., 2011) や、ボールリリース時における体幹の前傾角度が小さく、左傾角度が大きいこと (宮西ら, 1995) などが確認されている。これらのことは、野球ボールを用いる投動作では、前方向のリリース速度を高める動作と上方向のリリース速度を高める動作には、それぞれ異なる点が存在することを意味している。このことから、やり投げにおいても、前方向のリリース速度を高める動作と上方向のリリース速度を高める動作には、それぞれ異なる点が存在することが考えられる。この考えに基づくと、本章で取り上げた高いリリース速度の獲得と関係する動作には、前あるいは上方向のどちらか一方のみとしか関係しないものが存在する可能性がある。仮に、先行研究において合成のリリース速度との関係が報告されている動作のうち、前および上方向のいずれか一方のみとしか関係しないものが存在するのであれば、選手は目的とする動作を獲得できたとしても、2方向のリリース速度の一方のみが増大することで

投射角が至適な値から逸脱し、飛距離の増大に悪影響を及ぼす危険性が指摘される。従って、適切な投射角を維持しながら合成のリリース速度を高めるための知見を得るためには、前および上方向のリリース速度と関係する動作をそれぞれ明らかにする必要がある。しかしながら、やり投げに関する先行研究において、リリース速度を前および上方向に分け、それぞれの方向のリリース速度と関係する動作を検討したものはない。(問題点 2)

さらに、やり投げは投てき局面のみに着目しても、左膝を伸展位に維持する動作、体幹の起こし回転、および投てき腕の運動連鎖などが同時に行われる複雑な全身運動である。そのため、やり投げ動作を評価するためには、全身の角度や角速度など、多数のデータについて同時に考慮する必要がある。このような背景から、村上ら(2009)はやり投げ動作を評価する際に「可能であれば、ある特定の動作にとらわれることなく、投てき動作全体の特徴を簡便に評価できることが望まれる」と述べている。そこで村上ら(2009)の研究では、田内ら(2006)の報告した下肢—体幹—上肢モデルを用いて、やり投げ動作を評価している。このモデルは砲丸投げを対象としたものであり、時々刻々と変化する砲丸速度を合計 5 つの動作によって獲得された砲丸速度の総和として考えることで、砲丸速度に対する身体各部の貢献の仕方を定量化するものである。従って、下肢—体幹—上肢モデルは、バイオメカニクス研究において頻繁に用いられてきた、投てき動作を関節運動ごとに評価する手法とは異なり、投てき動作全体の特徴を簡便に評価できるモデルである。その一方で、下肢—体幹—上肢モデルは投てき物の速度のうち、前方速度に対する身体各部の貢献の仕方しか考慮できないという限界点も存在する。ここまで何度か述べたように、やりを遠くに投げるためには、前および上方向のリリース速度の両者を同時に高める必要がある。従って、やり投げ動作を適切に評価するためには、前方向のみならず、上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方についても同時に定量化する必要があると考えられるものの、このことを報告した研究はない。(問題点 3)

1.2 本研究の目的および課題

研究小史においてやり投げに関する先行研究を概観することで、以下に示す問題点が挙げられた。

1. 投てき動作を時系列で捉え、リリース速度と関係する動作を検討した研究が少ない。
2. リリース速度を前および上方向に分け、それぞれの方向のリリース速度と関係する動作を個々に検討した研究がない。
3. 前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を明らかにした研究がない。

本論文では、上述した問題を解決することによって、高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムを明らかにすることを目的とした。この目的を達成するために本論文では、やり投げにおけるリリース時の前および上方向のやり速度と関係する動作を個々に明らかにすること（**第2章**）、時々刻々と変化する前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を明らかにすること（**第3章**）を研究課題として設定した。具体的には、第2章では前および上方向のリリース速度と動作（身体重心速度および身体各部の角度、角速度）との相関関係をそれぞれ検討することで、高い前および上方向のリリース速度の獲得と関係する姿勢および関節運動を明らかにする。しかしながら、第2章の結果からでは、速度と有意な相関関係にあった動作がどのように前あるいは上方向の速度に貢献していたのかについては検討できないことから、第3章では、前および上方向のやり速度に対する速度獲得モデルを構築することで、リリース速度の高い選手がどのような動作によって高いやり速度を獲得していたのかを明らかにする。これらの研究課題を検討することで、やり投げにおける高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムを明らかにすることができ、競技パフォーマンスの向上に対する一助となる知見が得られるものと考えられる。本論文の仮説は、高い前および上方向のやり速度を獲得するメカニズムに

は異なる点が存在するというものである.

第2章 前および上方向のリリース速度と関係するキネマティクスの要因

2.1 目的

本章の目的は、前および上方向のリリース速度と関係するキネマティクスの要因をそれぞれ明らかにすることである。

2.2 方法

2.2.1 対象者

実際の試合に出場した、初心者レベルから世界トップレベルまでを含む、男子やり投げ選手 115 名を対象とした。なお、全ての対象者は右投げであった。分析試技は、各対象者の個人内で記録が最も良かった試技とした。本章の分析試技における投てき記録の平均値±標準偏差は $65.89 \pm 12.07\text{m}$ (39.09–90.33m) であった。

2.2.2 データ収集および処理

試合における対象者の投てき動作は、助走路の側方および後方に設置された 2 台のデジタルビデオカメラによって撮影された。カメラのフレームレートは 60Hz、露光時間は 1/1000 秒であった。やり投げ助走路の中央およびファールラインより後方 6m を原点とし、撮影範囲は投てき方向に 6m、左右方向に 4m、上下方向に 2.5m とした。そして、原点に対して右方向を X 軸、投てき方向を Y 軸、上方向を Z 軸とした静止座標系を定義した。また、競技の開始前に撮影範囲内の 9 点にキャリブレーションポールを映しこんだ。なお、実際の競技会におけるデータ収集は、主催者の許可を得て実施された。

撮影された映像から、身体部分 23 点およびやり 2 点の計 25 点を動作分析ソフト (Frame DIAS IV, Q'sfix 社製) によって手動でデジタル化した。デジタルポイントの座標値は、3 次元 DLT 法によって算出された。得られた 3 次元座標値は、遮断周波数を 8Hz に設定し

た4次の Butterworth low-pass digital filter によって平滑化した。なお、遮断周波数は先行研究に準じて決定した（瀧川ら，2020；瀧川と田内，2020）。

分析局面は最後の右足が接地した時点（R-on）からやりをリリースした時点（Rel）までとし，R-on から左足が接地した時点（L-on）を準備局面，L-on から Rel までを投てき局面と定義した。なお，後述する時系列データは，準備局面と投てき局面における平均所要時間の比がおよそ6：4であったことから，準備局面を0–60%，投てき局面を60–100%に規格化した（図2）。

2.2.3 算出項目

(1) リリース速度

やりのグリップの変位を時間で微分することで，やり速度を算出した。そのうち，リリース時のやり速度をリリース速度とした。なお，本章では前方向，右方向，上方向，および合成のリリース速度を算出した。

(2) 投射角度

リリース速度の前方成分と上方成分から，逆三角関数によって算出した。

(3) キネマティクスデータ

本章ではキネマティクスデータとして，身体重心速度，および左膝の屈伸，体幹の前後傾，左右傾，回旋，右肩の内外転，内外旋，水平内外転，右肘の屈伸における角度と角速度を算出した（図3）。

身体重心速度（前および上方向）は，阿江ら（1992）の身体部分係数を用いて，身体重心位置を推定し，それを時間で微分することで算出した。身体部分あるいは関節における角度の算出方法は，小林ら（2012）の方法に基づいた。左膝の屈伸角度は，左脚における大腿と下腿のなす角度とした。体幹の前後傾，左右傾，および回旋角度を算出するために，静止座標系 **Z** 軸と左股関節から右股関節へ向かう腰ベクトル **S_{hip}**

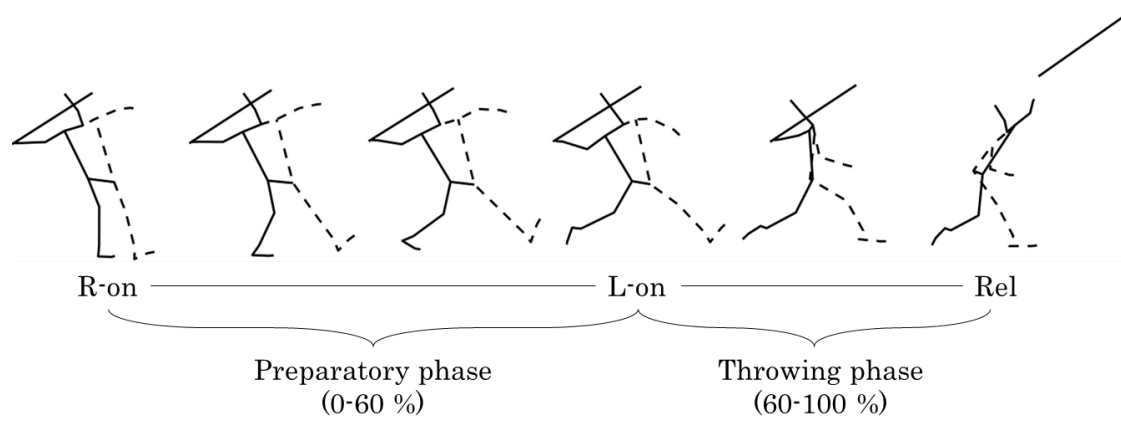


图 2 局面定義

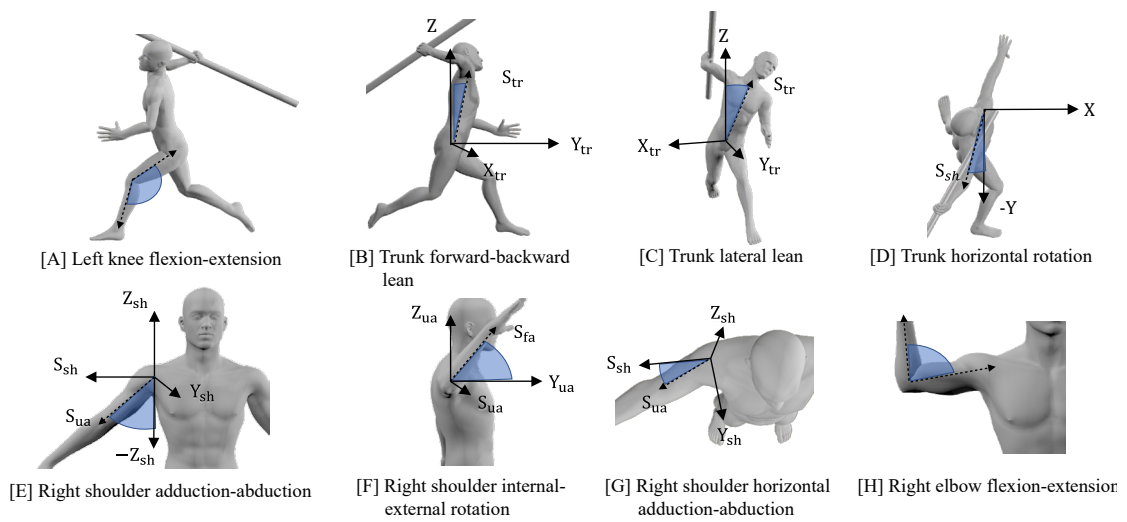


図 3 キネマティクスデータの定義

との外積により、 \mathbf{Y}_{tr} 軸を求め、 \mathbf{Y}_{tr} 軸と \mathbf{Z} 軸との外積により \mathbf{X}_{tr} 軸を決定した。そして、体幹の前後傾角度は、両股関節の中心から両肩中心に向かう体幹ベクトル \mathbf{S}_{tr} を $\mathbf{Y}_{tr}\mathbf{Z}$ 平面に投影したベクトルが \mathbf{Z} 軸となす角度とした。体幹の左右傾角度は、体幹ベクトル \mathbf{S}_{tr} を $\mathbf{X}_{tr}\mathbf{Z}$ 平面に投影したベクトルが \mathbf{Z} 軸となす角度とした。体幹の回旋角度については、左肩関節から右肩関節に向かうベクトル \mathbf{S}_{sh} を水平面に投影したベクトルが静止座標系 $-\mathbf{Y}$ 軸となす角度とした。右肩の内外転、内外旋、水平内外転角度を算出するために、体幹ベクトル \mathbf{S}_{tr} と肩ベクトル \mathbf{S}_{sh} との外積により \mathbf{Y}_{sh} 軸を求め、 \mathbf{S}_{sh} と \mathbf{Y}_{sh} との外積により \mathbf{Z}_{sh} 軸を決定した。右肩関節の内外転角度は、右肩関節から右肘関節へ向かう右上腕ベクトル \mathbf{S}_{ua} を $\mathbf{S}_{sh}\mathbf{Z}_{sh}$ 平面に投影したベクトルと $-\mathbf{Z}_{sh}$ 軸とのなす角度とした。 \mathbf{Z}_{sh} 軸と上腕ベクトル \mathbf{S}_{ua} との外積により、 \mathbf{Y}_{ua} 軸を求め、 \mathbf{S}_{ua} と \mathbf{Y}_{ua} 軸の外積により \mathbf{Z}_{ua} 軸を決定した。右肩関節の内外旋角度は、右肘関節から右手関節へ向かう右前腕ベクトル \mathbf{S}_{fa} を $\mathbf{Y}_{ua}\mathbf{Z}_{ua}$ 平面に投影したベクトルと \mathbf{Y}_{ua} 軸とのなす角度とした。右肩関節の水平内外転角度は、右上腕ベクトル \mathbf{S}_{ua} を $\mathbf{S}_{sh}\mathbf{Y}_{sh}$ 平面に投影したベクトルと \mathbf{Y}_{sh} 軸とのなす角度とした。右肘角度は、右上腕と右前腕とのなす角度とした。なお、上述した身体部分あるいは関節の角速度は、角度データを時間で微分することで算出した。

2.2.4 統計処理

記録とリリース速度および投射角度の関係、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度の関係は、ピアソンの積率相関係数を算出することによって確認した。また、本研究の対象者には初心者から世界トップまでの広範な競技水準の選手が存在することから、合成のリリース速度において大きな範囲を有している。従って、前および上方向のリリース速度の関係を本研究の対象者全体で確認する場合には、合成のリリース速度の違いが影響する可能性が考えられることから、本研究では、前および上方向のリリース速度の関係を対象者

全体で確認するだけでなく、記録が同程度の選手で群分けし、各群内での相関関係も確認した。また、前および上方向のリリース速度とキネマティクスとの関係は、偏相関係数を算出することで確認した（規格化時間 5%ごとに検定を実施）。すなわち、前方向のリリース速度とキネマティクスとの関係を確認する場合には、上方向のリリース速度を制御要因とし、上方向のリリース速度とキネマティクスの関係を確認する場合には、前方向のリリース速度を制御要因とした。なお、いずれの検定においても、統計的有意水準は 5%未満とした。

2.3 結果

表 1 には、記録およびリリース速度、投射角度の平均値±標準偏差を示している。記録と合成、前および上方向のリリース速度、投射角度との間では有意な正の相関関係が認められた。

図 4 には、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度の関係を示している。両者の関係を本章の対象者全体で確認すると、有意な正の相関関係が認められた。その一方で、対象者を記録に基づいて群分けし、各群内における前および上方向のリリース速度の関係を確認すると、全ての群において負の相関関係が認められた。

図 5 には、前および上方向の身体重心速度の変化と、前および上方向のリリース速度との関係を示している。前方向の身体重心速度 (A) は、0-100%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、0-85%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。上方向の身体重心速度 (B) は、15-55%時において前方向のリリース速度と有意な負の偏相関、25-70%時において上方向のリリース速度と有意な負の偏相関、100%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。

図 6 には、左膝の屈伸 (A)、体幹の前後傾 (B)、左右傾 (C)、回旋 (D) における角度および角速度の変化と、前および上方向のリリース速度との関係を示している。左膝の伸展角度は、0-20%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、50-100%時におい

表 1 記録およびリリースパラメータの平均値±標準偏差

		Mean	±	SD	r
Record	[m]	65.89	±	12.07	-

Initial velocity					
	Resultant [m/s]	24.3	±	2.2	0.905 ^{***}
	Rightward [m/s]	2.4	±	1.9	0.038
	Forward [m/s]	19.9	±	2.0	0.753 ^{***}
	Upward [m/s]	13.5	±	1.7	0.792 ^{***}

Release angle	[deg]	34.1	±	3.3	0.212 [*]

*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$

r: correlation coefficient

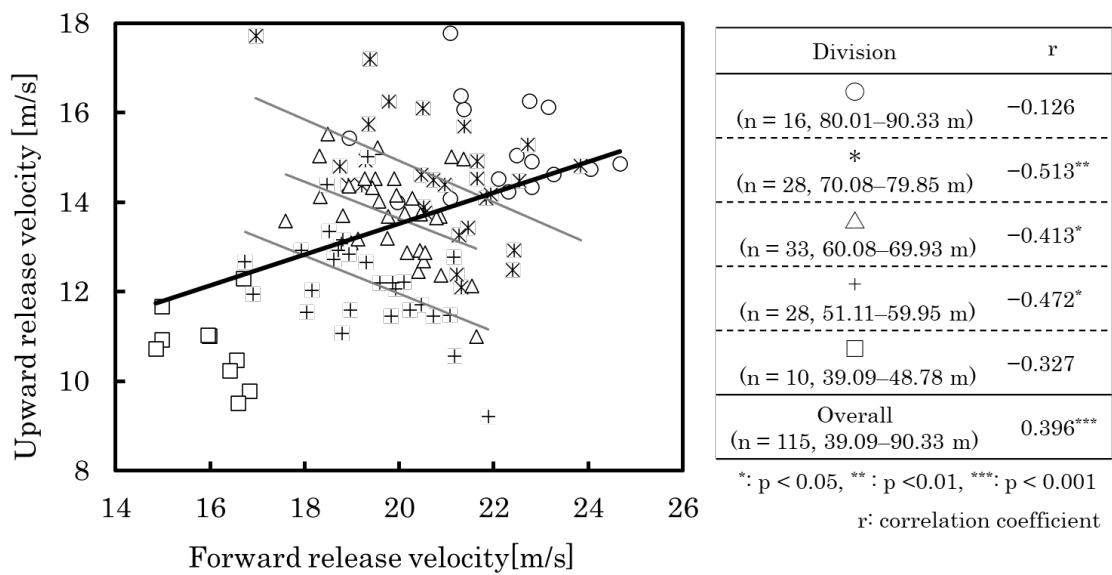
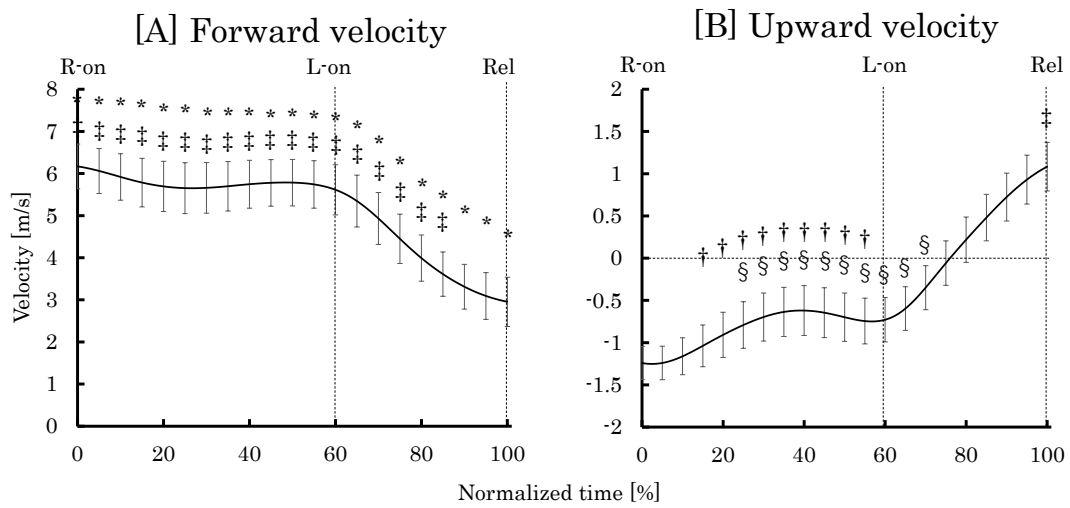
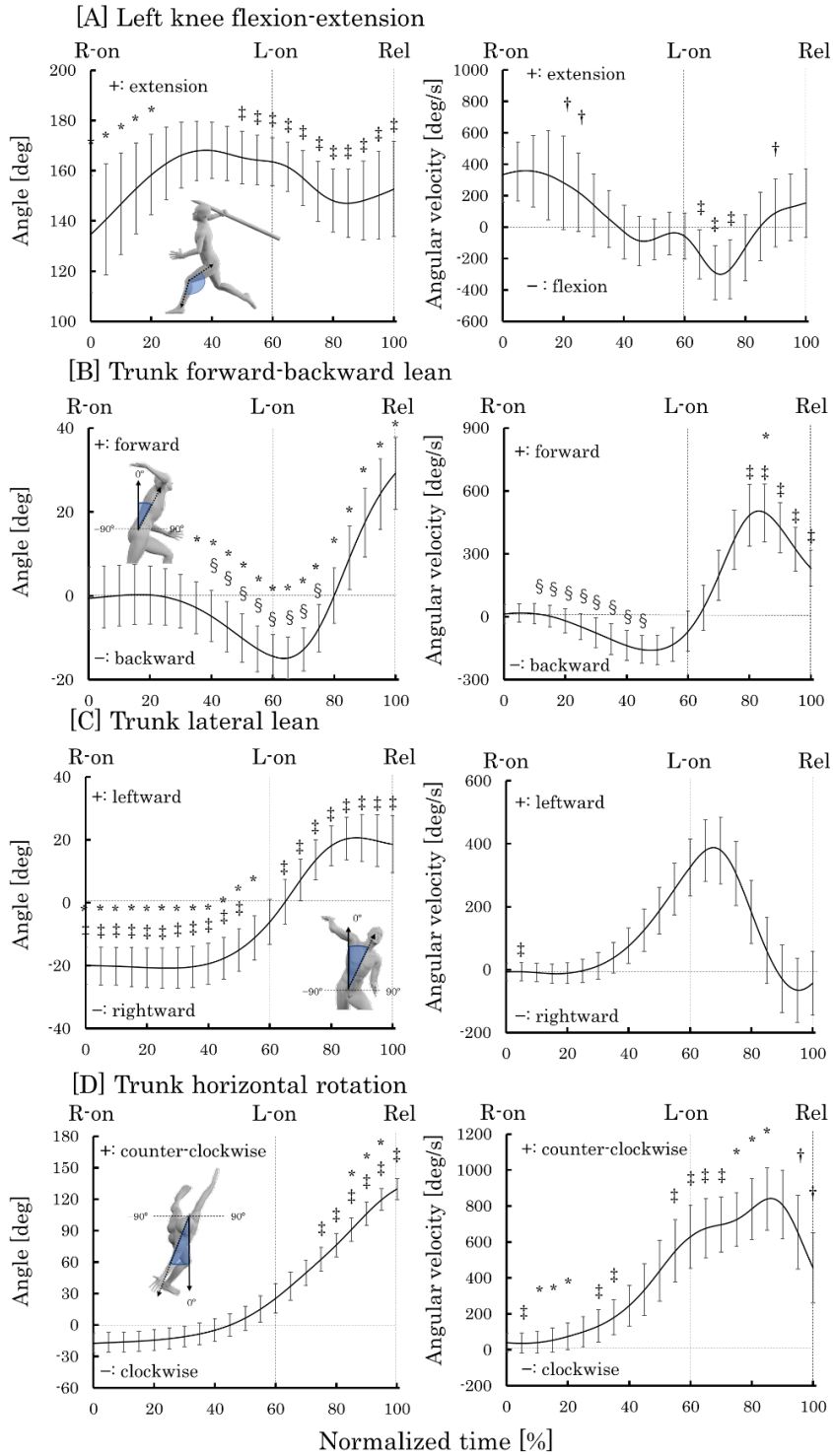


図4 前方向のリリース速度と上方向のリリース速度の間の相関関係



*: Significant positive partial correlation, †: Significant negative partial correlation
vs. Forward release velocity (Controlled: Upward release velocity)
‡: Significant positive partial correlation, §: Significant negative partial correlation
vs. Upward release velocity (Controlled: Forward release velocity)

図5 前および上方方向の身体重心速度の時系列データと前および上方方向のリリース速度との関係

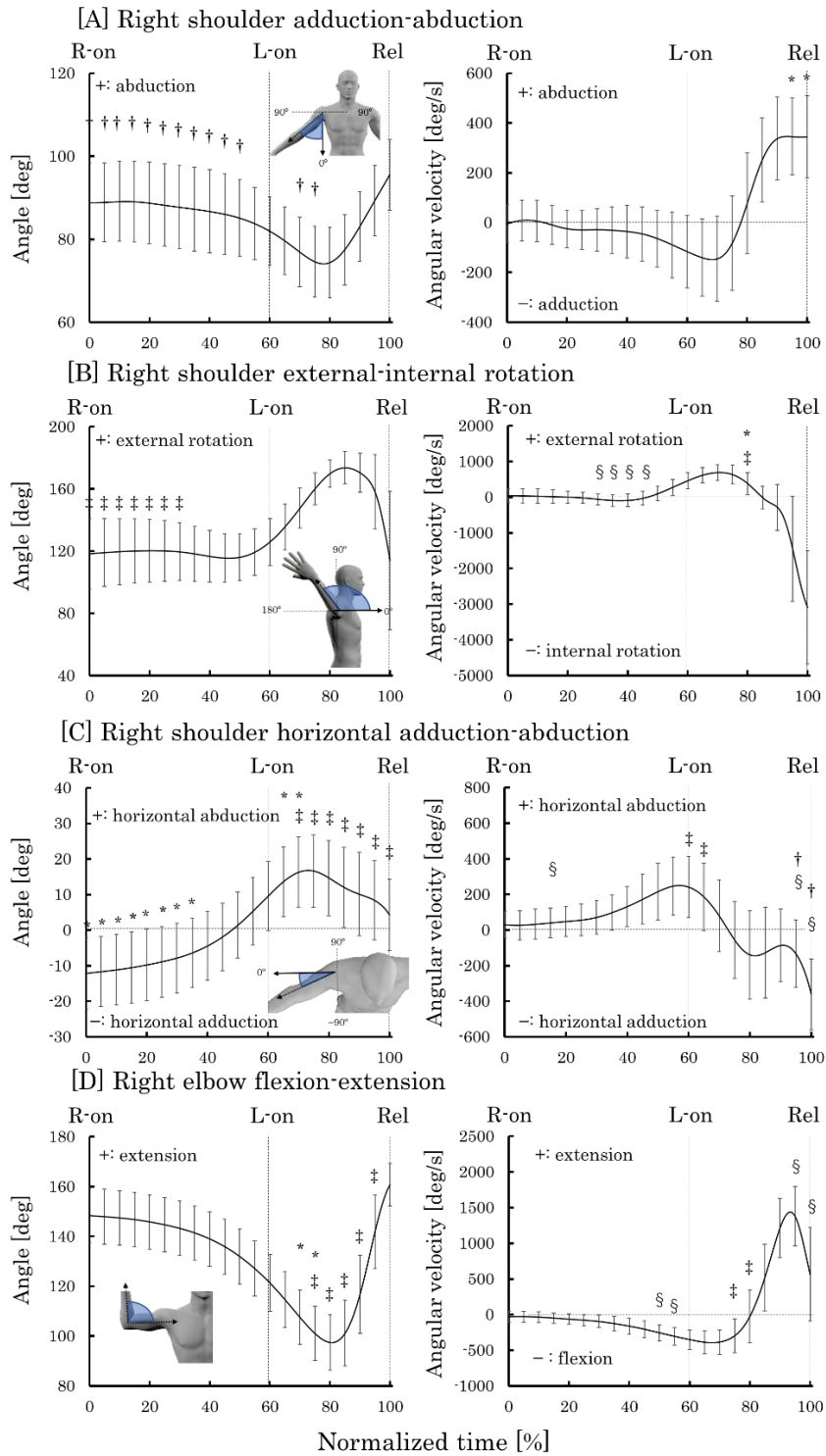


*: Significant positive partial correlation, †: Significant negative partial correlation vs. Forward release velocity (Controlled: Upward release velocity)
 ‡: Significant positive partial correlation, §: Significant negative partial correlation vs. Upward release velocity (Controlled: Forward release velocity)

図6 左膝および体幹の角度，角速度の時系列データと前および上方のリリース速度との関係

て上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。左膝の伸展角速度は、20–25、90%時において前方向のリリース速度との間で有意な負の偏相関、65–75%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。体幹の前傾角度は、35–100%時において前方向のリリース速度との間で有意な正の偏相関、40–75%時において上方向のリリース速度との間で有意な負の偏相関が認められた。体幹の前傾角速度は、85%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、10–45%時において上方向のリリース速度と有意な負の偏相関、80–100%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。体幹の左傾角度は、0–55%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、0–50、65–100%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。体幹の左傾角速度は、5%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。体幹の左回旋角度は、85–95%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、75–100%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。体幹の左回旋角速度は、10–20、75–85%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、95–100%時において有意な負の偏相関、5、30–35、55–70%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。

図7には、右肩の内外転(A)、内外旋(B)、水平内外転(C)、右肘の屈伸(D)における角度および角速度の変化と、前および上方向のリリース速度との関係を示している。肩の外転角度は、0–50、60–65%時において前方向のリリース速度と有意な負の偏相関が認められた。肩の外転角速度は、95–100%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。肩の外旋角度は、0–30%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。肩の外旋角速度は、80%時において前および上方向のリリース速度と有意な正の偏相関、30–45%時において上方向のリリース速度と有意な負の偏相関が認められた。肩の水平外転角度は、0–35、65–70%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、70–100%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。肩の水平外



*: Significant positive partial correlation, †: Significant negative partial correlation
 vs. Forward release velocity (Controlled: Upward release velocity)
 ‡: Significant positive partial correlation, §: Significant negative partial correlation
 vs. Upward release velocity (Controlled: Forward release velocity)

図7 右肩および右肘の角度，角速度の時系列データと前および上方のリリース速度との関係

転角速度は、95–100%時において前および上方向のリリース速度との間で有意な負の偏相関、15%時において上方向のリリース速度との間で有意な負の偏相関、60–65%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。右肘の伸展角度は、70–75%時において前方向のリリース速度と有意な正の偏相関、75–95%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関が認められた。右肘の伸展角速度は、75–80%時において上方向のリリース速度と有意な正の偏相関、50–55、95–100%時において有意な負の偏相関が認められた。

2.4 考察

2.4.1 前および上方向のリリース速度

最初に、本章ではやり投げにおける記録の優れた選手は、合成のリリース速度が高かったことが示された（表 1）。この結果は、やり投げにおける記録の向上には、リリース速度が強く関係していることを示唆しており、多くの先行研究（Bartlett et al., 1996; Komi and Mero, 1985; Mero et al., 1994; Whiting et al., 1991）と同様の結果が得られた。また、合成のリリース速度を構成する 3 方向の成分のうち、前および上方向のリリース速度は、記録の高い者ほど高かった（表 1）。このことは、より優れた記録を達成するためには、前および上方向のリリース速度の双方を同時に高めることで、より高い合成のリリース速度を獲得する必要があることを示唆するものである。

次に、リリース速度における前方成分と上方成分との関係を確認したところ、本研究の対象者全体では、有意な正の相関関係が認められた（図 4）。しかしながら、両者の有意な正の相関関係には、本章における対象者が初心者から世界トップまでの広範な競技レベルを有していることから、合成のリリース速度自体に大きな範囲を有していたことが影響した可能性が考えられる。そこで、両速度の関係を、記録水準が同程度の者間で確認すると、全ての群において負の相関関係が認められた（そのうち、70m 台、60m 台、50m 台の選手

では有意性が確認された)。このことは、前および上方向のリリース速度には、トレードオフの関係が存在することを示唆するものである。つまり、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度は、それぞれ異なる要因によって獲得されていることが推察される。また、80m 以上および 50m 以下の選手において有意な相関関係が認められなかった点については、2 つの群がやり投げ選手の記録における正規分布の両端に位置する者であることから、サンプル数が十分でなかった可能性がある。

2.4.2 前および上方向のリリース速度の両者と関係する要因

前および上方向のリリース速度の両者と関係する要因には、準備局面における身体重心の前方速度が挙げられた (図 5 (A))。田内ら (2012) は、記録を従属変数、記録の増減と関係する各種動作要因を独立変数とした重回帰分析を行った結果、記録と最も強く関係する要因は、L-on 時の身体重心速度であったことを明らかにしている。また、やり投げでは、L-on 後に全身の力学的エネルギーがやりへと伝達されることが報告されている (Morris et al., 2001)。これらのことから、身体重心速度を高めることは、全身の保持する力学的エネルギーを増大させるため、L-on 後により大きなエネルギーをやりへと伝達させられる点において有利であると考えられる。

また、準備局面における体幹の右傾角度は、前および上方向のリリース速度の高い者ほど小さかった (図 6 (C))。本章における体幹の右傾角度は、対象者の前額面内における体幹ベクトル (S_{tr}) と鉛直軸とのなす角度として定義されている。そのため、やり投げ選手が投てき方向に対して右方向に正対する準備局面では、本章における体幹の右傾は、体幹が投てき方向に対して後方に傾く動作となる。Bartoniets (2000) は、準備局面における体幹の後傾 (投てき方向に対する後傾) が大きいことは、接地足 (右投げの場合、右足) と身体重心との水平距離を増大させるため、身体重心速度を減速させる要因となると指摘している。従って、前および上方向のリリース速度の双方の高かった選手では、準備局面における体幹をよ

り直立位に近づけることで、身体重心速度の減速を防ぎ、全身により大きな力学的エネルギーを保持した状態で投てき局面へと移行させていたと考えられる。

2.4.3 前方向のリリース速度と関係する要因

L-on 付近では、前方向のリリース速度の高い選手ほど、体幹の後傾角度が小さかった (図 6 (B))。上述したように、本章では準備局面における体幹の右傾角度が大きいことは、投てき方向に対する体幹の後傾を大きくするため、身体重心速度を減速させる要因になることを示唆している。しかしながら、L-on 直前からは体幹が投てき方向に回転し始めるため、L-on 付近における体幹の後傾角度が大きいことも、Bartonietz (2000) の指摘する、身体重心速度を減速させる要因になると考えられる。従って、前方向のリリース速度の高い選手では、準備局面における体幹の右傾および後傾角度の双方を小さくすることで、体幹を直立位に近づけ、身体重心速度の減速を防ぐ動作を行っていたと考えられる。

投てき局面では、前方向のリリース速度の高い選手ほど前方向の身体重心速度が高かった (図 5 (A))。やり投げでは、L-on 後に身体重心速度が大きく減速するものの、記録の優れた選手では、Rel 時における身体重心速度が高かったことが報告されている (村上と伊藤, 2003)。本章の結果は、村上と伊藤 (2003) の結果を支持するものであり、Rel 時における身体重心速度が高いことは、特に前方向のリリース速度と関係していることが明らかとなった。

加えて投てき局面では、前方向のリリース速度の高い選手ほど L-on 後の右肩の内転 (図 7 (A)) および水平外転角度 (図 7 (C)) が大きく、Rel 時における右肩の外転 (図 7 (A)) および水平内転角速度 (図 7 (C)) が高かった。さらに、投てき局面中盤では、前方向のリリース速度の高い選手ほど体幹の前傾 (図 6 (B)) および左回旋角速度 (図 6 (D)) が高かった。これらのことから、前方向のリリース速度の高い選手では、右肩をより内転および水平外転させた姿位から体幹をより速く前傾および左回旋させることで、右肩周りの筋群をよ

り速く伸長させ、それにより、その後の力発揮を高める伸長—短縮サイクル (SSC) を効果的に利用し、Rel 時における右肩の外転および水平内転角速度を高めていたことが考えられる。そのなかでも右肩の外転動作は、体幹が投てき方向に正対している場合、回転軸 (Y_{sh}) が静止座標系の Y 軸上に定義されるため、やりの前方速度を高める要因とならないことが予想される。しかしながら、前方向のリリース速度の高い選手は、Rel 時において体幹がより前傾位であったため (図 6 (B))、その姿勢から右肩の外転角速度を高めることは、上肢を水平面内で回転させることになり、前方向のリリース速度を高める動作となっていたことが考えられる。

2.4.4 上方向のリリース速度と関係する要因

L-on 前から Rel 時まででは、上方向のリリース速度の高い選手ほど左膝がより伸展位であるとともに、L-on 後の左膝の屈曲角速度が低かった (図 6 (A))。このことは、上方向のリリース速度の高い選手ほど、投てき局面における左膝をより伸展位に維持していたことを示唆するものである。村上と伊藤 (2003) は、投てき局面において左膝を伸展位にすることは、体幹の並進運動を回転運動に効果的に変換し、体幹の前傾角速度を高める要因となることを指摘している。また、本研究では、上方向のリリース速度の高い選手ほど投てき局面後半における体幹の前傾角速度が高いことを確認している (図 6 (B))。これらのことから、上方向のリリース速度の高い選手では、村上と伊藤 (2003) の指摘するように、左膝をより伸展位に維持することで体幹の並進運動を回転運動へと効果的に変換し、体幹の前傾角速度を高めていたと考えられる。さらに、投てき局面における姿勢に着目すると、上方向のリリース速度の高い選手では、体幹の後傾 (図 6 (B)) および左回旋 (図 6 (D))、右肩の水平外転 (図 7 (C))、右肘の伸展 (図 7 (D)) における角度が大きかった。このことは、上方向のリリース速度の高い選手ほど、体幹がより後傾位であるとともに、やりのグリップを体幹に対してより後方に位置させていたことを示唆するものである。このような姿勢から体幹

を前傾させることは、やりを上方向に動かす動作となると考えられる。従って、投てき局面後半における体幹の前傾角速度を高めることは、上方向のリリース速度を高める一要因となっていたことが推察される。

リリース時では、上方向のリリース速度の高い選手ほど右肩の水平内転角速度が高かった（図 7 (C)）。また、上述した通り、上方向のリリース速度の高い選手では、投てき局面においてグリップを体幹の後方に残す姿勢をとること、および体幹の前傾角速度が高いことが示されている。このような動作を行う場合、右肩周りの筋群はより速く伸長されることが推察される。従って、上方向のリリース速度の高い選手ではグリップを後方に残した姿勢から体幹の前傾角速度を高めることによって、右肩周りの筋群における SSC をより効果的に利用し、Rel 時の右肩の水平内転角速度を高めていた可能性が考えられる。しかしながら、右肩の水平内転は、体幹が直立位の場合では水平面内での運動に過ぎないため、上方向のリリース速度と関係しているとは考えにくい。他方、上方向のリリース速度の高い選手では、投てき局面において体幹がより左傾していたことが確認されている（図 6 (C)）。体幹が左傾している場合、右肩の水平内転における回転軸 (Z_{sh}) も同様に左に傾く。このことを考慮すると、上方向のリリース速度の高い選手では、体幹を左傾させることで、右肩の水平内転を上方向のやり速度を獲得するための動作にしていたことが考えられる。

2.4.5 前および上方向のリリース速度との間で相反する要因

本章における前および上方向のリリース速度との間で相反する要因には、L-on 付近における体幹の前後傾角度が確認された（図 6 (B)）。このことについて、L-on 付近における体幹の前後傾角度は、前方向のリリース速度の高い選手ほど直立位に近く、上方向のリリース速度の高い選手ほどより後傾していた。従って、L-on 付近における体幹の前後傾角度は、前と上方向のリリース速度との間で確認された、トレードオフの関係に直接的な影響を与える要因であったことが考えられる。なお、野球の投動作に関する研究においても、ボール

を斜め上方向に投げる遠投動作では、前方向に投げるピッチング動作よりも体幹が後傾位であったことが報告されていることから (Fleisig et al., 2013; 宮西ら, 1995), 体幹の後傾角度はやり投げに限らず, 上手投げ運動における前および上方向のリリース速度のトレードオフに影響を与える動作であることが推察される.

2.5 概括

本章では、やり投げにおける前および上方向のリリース速度と関係するキネマティクスの要因をそれぞれ検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1. 同程度の記録水準を有する選手内において、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度との間には、負の相関関係が認められた。
2. 準備局面における前方向の身体重心速度は、前および上方向のリリース速度の両者と関係していた。
3. L-on 時における体幹の前後傾角度は、前方向のリリース速度の高い選手ほど直立位に近く、上方向のリリース速度の高い者ほどより後傾位であった。
4. Rel 時では前方向のリリース速度の高い選手ほど右肩の外転および水平内転角速度が高く、上方向のリリース速度の高い選手ほど体幹の前傾および右肩の水平内転角速度が高かった。

これらのことから、本章では前方向のリリース速度と上方向のリリース速度との間にはトレードオフの関係が存在すること、および 2 方向のリリース速度と関係する動作はそれぞれ異なることが明らかとなった。

第3章 前および上方向のやり速度に対するキネマティクスの貢献

3.1 目的

本章の目的は、前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を明らかにするとともに、前および上方向のリリース速度の高い選手の特徴を検討することとした。

3.2 方法

3.2.1 対象者

対象者は第2章と同様であった。

3.2.2 データ収集および処理

データ収集および処理の方法は第2章と同様であった。

3.2.3 算出項目

(1) 前および上方向のリリース速度

前および上方向のリリース速度は、第2章と同様の方法で算出した。

(2) 前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方

本章では、田内ら(2006)の方法に基づいて、前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を算出した。すなわち、やりの速度(\mathbf{V}_J)は股関節中心の速度(\mathbf{V}_L)と股関節中心に対する両肩中心の相対速度($\mathbf{V}_{T/L}$)、両肩中心に対するやりの相対速度($\mathbf{V}_{J/T}$)の総和として、以下のように表される(図8)。

$$\mathbf{V}_J = \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_{T/L} + \mathbf{V}_{J/T}$$

そのうち、股関節中心の速度(\mathbf{V}_L)は“下肢”によって得られたやり速度、股関節中心に対する両肩中心の相対速度($\mathbf{V}_{T/L}$)は“体幹長軸の屈曲”によって得られたやり速

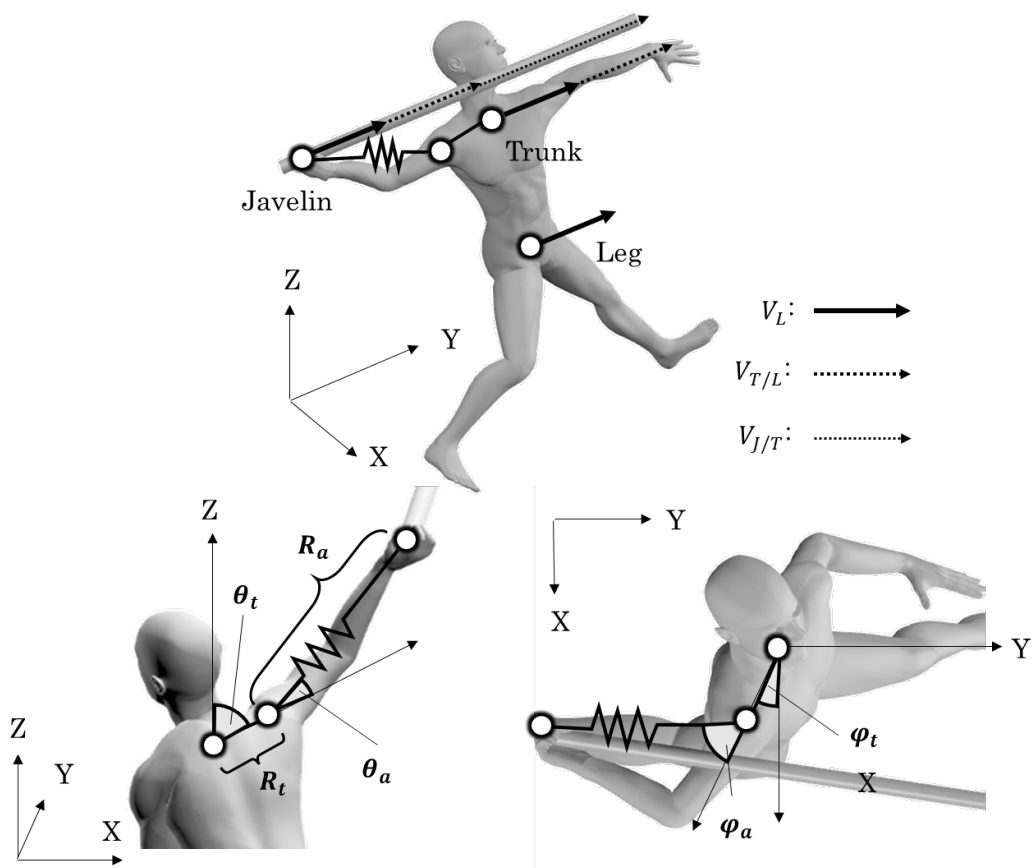


図 8 相対速度と三次元の極座標を用いたモデルの模式図

度と定義した。また，本章では両肩中心に対するやりの相対速度 ($\mathbf{V}_{J/T}$) を詳細に検討するため，両肩中心と右肩を結んだセグメント（体幹セグメント）と，右肩とやりのグリップを結んだセグメント（上肢セグメント）を，動径 (R)，天頂角 (θ)，方位角 (φ) からなる，2リンクの三次元極座標としてモデル化した（図8）。なお，三次元極座標の各成分は以下の式から算出した。

$$R_t = \sqrt{(x_{rs} - x_{cs})^2 + (y_{rs} - y_{cs})^2 + (z_{rs} - z_{cs})^2}$$

$$\theta_t = \cos^{-1} \left(\frac{z_{rs} - z_{cs}}{R_t} \right)$$

$$\varphi_t = \tan^{-1} \left(\frac{y_{rs} - y_{cs}}{x_{rs} - x_{cs}} \right)$$

$$R_a = \sqrt{(x_j - x_{rs})^2 + (y_j - y_{rs})^2 + (z_j - z_{rs})^2}$$

$$\theta_a = \cos^{-1} \left(\frac{z_j - z_{rs}}{R_a} \right) - \theta_t$$

$$\varphi_a = \tan^{-1} \left(\frac{y_j - y_{rs}}{x_j - x_{rs}} \right) - \varphi_t$$

ここで，添え字の t および a は，それぞれ体幹セグメントおよび上肢セグメントを示す。添え字の cs ， rs ，および j はそれぞれ，両肩中心，右肩，およびやりのグリップを示す。そして，両肩中心に対するグリップの相対位置（前後方向，鉛直方向）を，本章で定義した2リンクの三次元極座標によって示すと，以下の式の通りになる。

$$Y_{J/T} = R_t \sin \theta_t \sin \varphi_t + R_a \sin(\theta_t + \theta_a) \sin(\varphi_t + \varphi_a)$$

$$Z_{J/T} = R_t \cos \theta_t + R_a \cos(\theta_t + \theta_a)$$

これらの式を微分して以下に示す導関数を得ることで，前および上方向の $V_{J/T}$ を算出した。

$$\begin{aligned}
\dot{Y}_{J/T} &= \dot{R}_t \sin\theta_t \sin\varphi_t + \dot{\theta}_t (R_t \cos\theta_t \sin\varphi_t + R_a \cos(\theta_t + \theta_a) \sin(\varphi_t + \varphi_a)) \\
&\quad + \dot{\varphi}_t (R_t \sin\theta_t \cos\varphi_t + R_a \sin(\theta_t + \theta_a) \cos(\varphi_t + \varphi_a)) \\
&\quad + \dot{R}_a \sin(\theta_t + \theta_a) \sin(\varphi_t + \varphi_a) + \dot{\theta}_a (R_a \cos(\theta_t + \theta_a) \sin(\varphi_t + \varphi_a)) \\
&\quad + \dot{\varphi}_a (R_a \sin(\theta_t + \theta_a) \cos(\varphi_t + \varphi_a)) \\
\dot{Z}_{J/T} &= \dot{R}_t \cos\theta_t + \dot{\theta}_t (R_t (-\sin\theta_t) + R_a (-\sin(\theta_t + \theta_a))) + \dot{R}_a \cos(\theta_t + \theta_a) \\
&\quad + \dot{\theta}_a (R_a (-\sin(\theta_t + \theta_a)))
\end{aligned}$$

ここで、 \dot{R}_t の項は“体幹の伸縮”， $\dot{\theta}_t$ の項は“体幹の左右傾”， $\dot{\varphi}_t$ の項は“体幹の水平回転”， \dot{R}_a の項は“上肢の伸縮”， $\dot{\theta}_a$ の項は“上肢の上方回転”， $\dot{\varphi}_a$ の項は“上肢の水平回転”によって得られたやり速度と定義した。

以上のことから，時々刻々と変化するやり速度は“下肢”，“体幹長軸の屈曲”，“体幹の伸縮”，“体幹の左右傾”，“体幹の水平回転”，“上肢の伸縮”，“上肢の上方回転”，“上肢の水平回転”によって得られたやり速度の総和として表すことが出来る．なお，これらの動作要因は，相対速度と三次元の極座標を用いたモデルによって全身の関節運動を単純化して導出されたものである．例えば，前および上方向のやり速度に対する“下肢”の貢献は，左右の股関節や膝関節の伸展によって股関節中心を移動させる動作，“体幹長軸の屈曲”の貢献は，体幹の前屈や左屈によって両股関節中心に対する両肩中心の相対位置を変化させる動作など，上述した動作要因は，その時点の姿位および複数の関節運動に影響される．

3.2.4 統計処理

前方向のリリース速度と前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の関係，および上方向のリリース速度と上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の関係は，ピアソンの積率相関係数を算出することで確認した（規格化時間 5%ごとに検定を実施）．統計的有意水準

は 5%未満とした。

3.3 結果

図 9 には、前方向のやり速度と前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方における平均値の変化を示している。R-on から 40%時付近までは、前方向のやり速度のほとんどが下肢の貢献によるものだった。40%時以降は下肢の貢献が減少するとともに、体幹長軸の屈曲および上肢の伸縮の貢献が増加していた。投てき局面の後半では、体幹の水平回転および上肢の伸縮の貢献が増加していた。

図 10 には、前方向のやり速度と前方向のやり速度に対する各動作要因による貢献との相関関係を示している。なお、前方向のやり速度に対する体幹の伸縮による貢献は、全ての局面を通して値が 0 付近であったため、本章では示さなかった。下肢 (A) では、全ての局面を通して有意な正の相関関係が認められた。体幹長軸の屈曲 (B) では、75–90%時において有意な正の相関関係が認められた。体幹の左右傾 (C) では、90–95%時において有意な負の相関関係が認められた。体幹の水平回転 (D) では、0–30%時および 100%時において有意な負の相関関係、75–90%時において有意な正の相関関係が認められた。上肢の伸縮 (E) では、95–100%時において有意な正の相関関係が認められた。上肢の水平回転 (G) では、90–100%時において有意な正の相関関係、80%時において有意な負の相関関係が認められた。

図 11 には、上方向のやり速度と上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方における平均値の変化を示している。50%時付近から 70%時付近では、体幹の左右傾の貢献が増加するとともに、上肢の上方回転の貢献が減少していた。70%時以降では体幹の左右傾の貢献が減少するにつれて、上肢の上方回転の貢献が増加していき、90%時付近からは上肢の伸縮の貢献が増加していた。

図 12 には、上方向のリリース速度と上方向のやり速度に対する各動作要因による貢献と

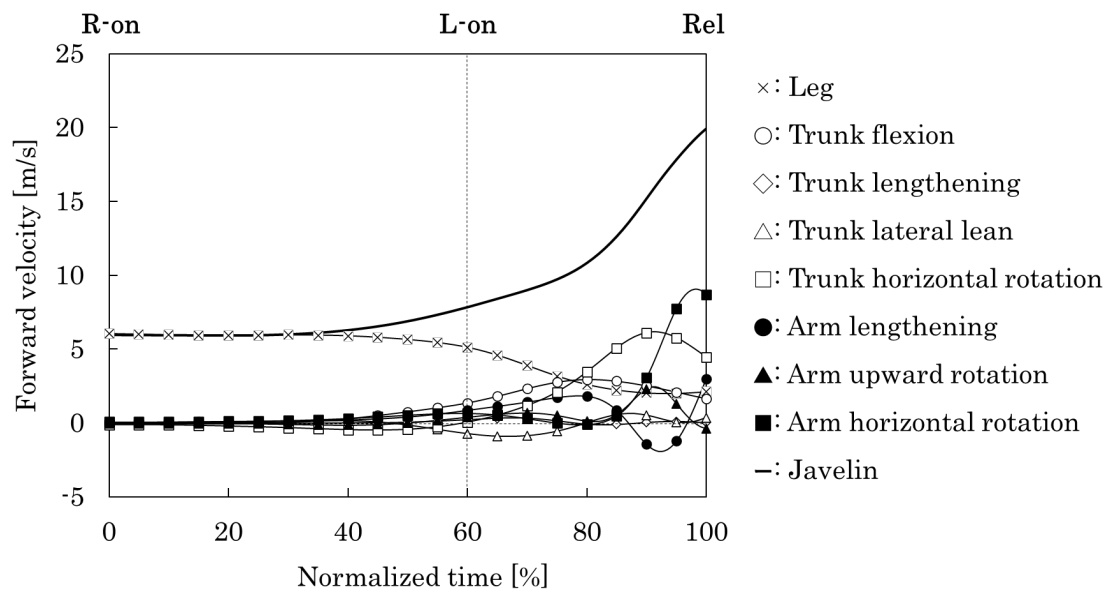


図9 前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方

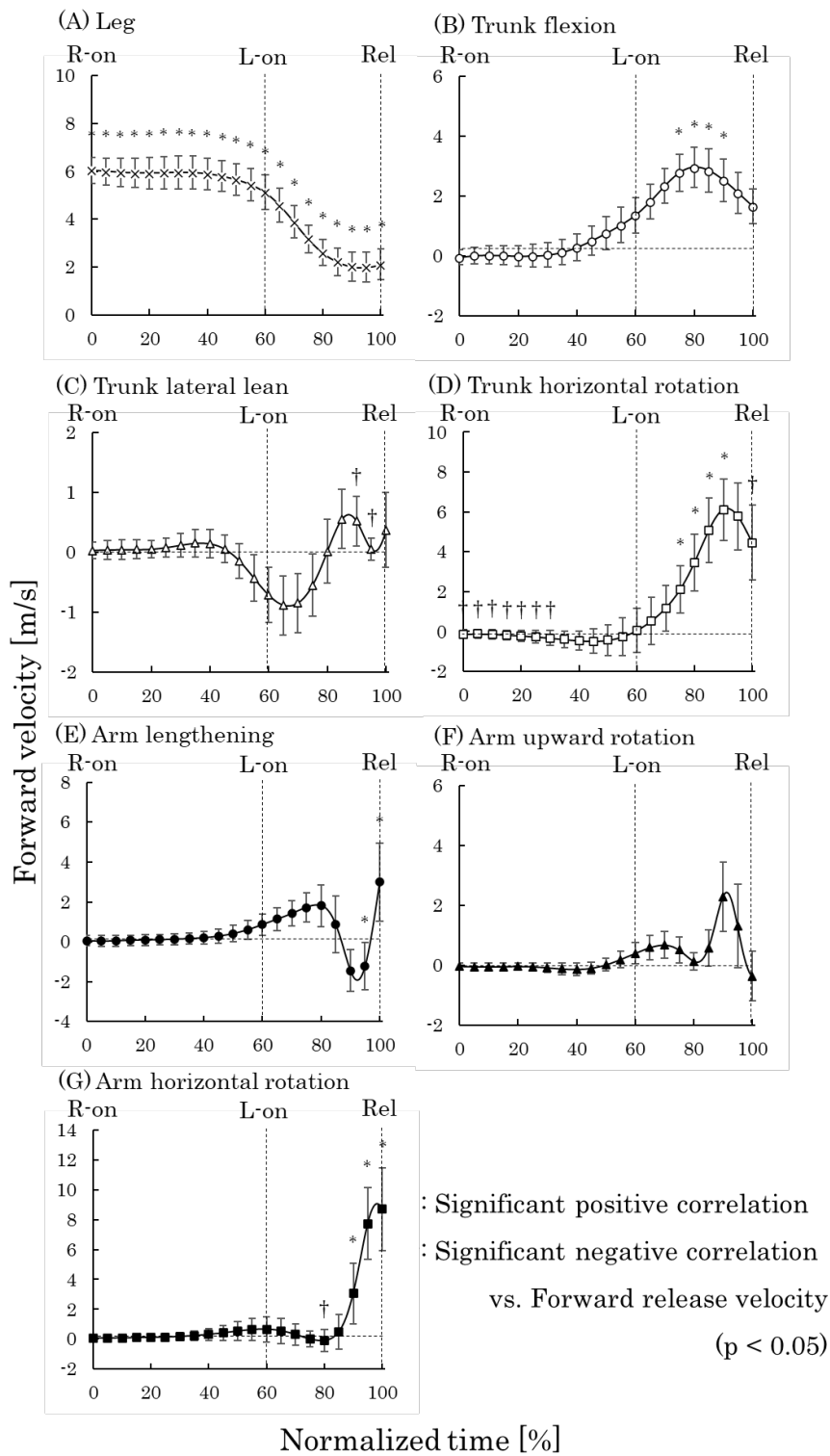


図 10 前方向のリリース速度と前方向のやり速度に対する身体各部の貢献との相関関係

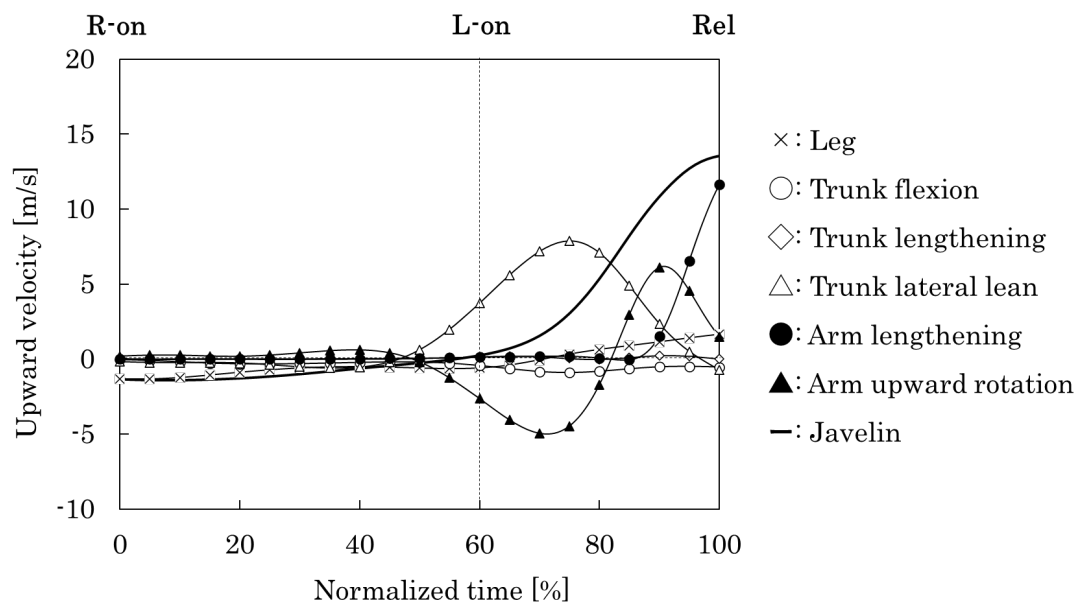


図 11 上方方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方

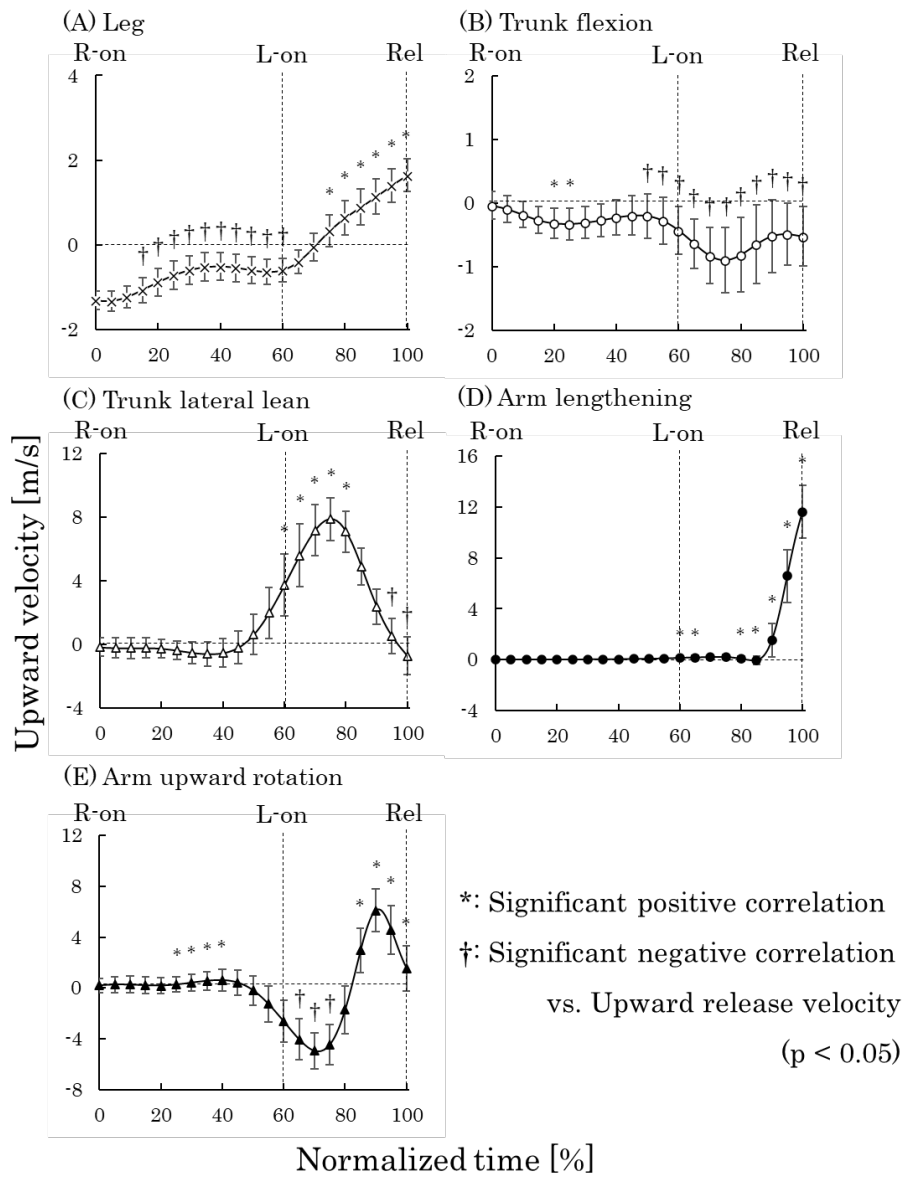


図 12 上方向のリリース速度と上方向のやり速度に対する身体各部の貢献との相関関係

の相関関係を示している。なお、図 9 と同様に、上方向のやり速度に対する体幹の伸縮による貢献は、全ての局面を通して値が 0 付近であったため、本章では示さなかった。下肢 (A) では、15–60% 時において有意な負の相関関係、75–100% 時において有意な正の相関関係が認められた。体幹長軸の屈曲 (B) では、20–25% 時において有意な正の相関関係、50–100% 時において有意な負の相関関係が認められた。体幹の左右傾 (C) では、60–80% 時において有意な正の相関関係、95–100% 時において有意な負の相関関係が認められた。上肢の伸縮 (D) では、60–65% 時および 80–100% 時において有意な正の相関関係が認められた。上肢の上方回転 (E) では、25–45% 時および 85–100% 時において有意な正の相関関係、65–75% 時において有意な負の相関関係が認められた。

3.4 考察

3.4.1 前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方

前方向のやり速度は、準備局面では主に下肢によって獲得されており、L-on 前から投てき局面中盤にかけて体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転によって加速され、Rel 前では上肢の水平回転によってさらに加速されていた (図 9)。このことは、前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の度合いが、下肢から体幹、上肢へと順を追って高くなっていたことを示している。こうした傾向は、田内ら (2006) のモデルを用いて、世界トップレベルの男子やり投げ選手 2 名を分析した研究 (田内ら, 2008) および日本トップレベルの男子やり投げ選手 1 名を分析した研究 (村上ら, 2009) においても確認されている。このことから、本章で用いた相対速度と 3 次元の極座標を用いたモデルは、男子やり投げ選手の投てき動作を適切に評価できていたことを示唆するものである。さらに、以下には前方向のリリース速度の高かった者がどの局面でどの動作による貢献を高めることによって、高い前方向のリリース速度を獲得していたのかを検討した。

全ての局面を通して、前方向のリリース速度の高い選手ほど下肢による貢献が高かった

(図 10 (A)). やり投げは助走を伴う競技であることから、前方向のやり速度に対する下肢の貢献(股関節中心の前方速度)は、主に準備局面以前に行われる、助走によって獲得された速度であると考えられる。また、やり投げでは記録の優れた選手ほど、Rel 時により高い身体重心速度を有していたことが報告されている(Bartlett et al., 1996; 村上と伊藤, 2003)。さらに、第 2 章においては、Rel 時における身体重心の前方速度が高いことは、前方向のリリース速度と関係していることを確認している(図 5 (A))。これらのことから、前方向のリリース速度の高い選手ほど、下肢(助走)によって獲得された前方向のやり速度を Rel 時まで高くすることで、より高い前方向のリリース速度を獲得していたと考えられる。

次に、投てき局面における体幹および上肢の貢献に着目すると、前方向のリリース速度の高い選手ほど、局面中盤における体幹長軸の屈曲(図 10 (B)) および体幹の水平回転(図 10 (D))、Rel 直前における上肢の水平回転(図 10 (G)) および上肢の伸縮(図 10 (E)) による貢献が高かった。やり投げでは、投てき局面において右肩、右肘、右手首、やりなどの最大速度が近位部から遠位部の順に出現する現象(運動連鎖)が確認されている(Mero et al., 1994; Campos et al., 2004; 田内ら, 2009; Liu et al., 2014; 瀧川ら, 2020)。また、やり投げ記録の優れた選手は、劣った者と比較して右腰、右肩、右肘、やりの最大速度が高いという報告もある(Whiting et al., 1991)。これらのことから、上述した結果は前方向のリリース速度の高い選手ほど、前方向のやり速度に対する身体各部の貢献の度合いを、近位部から遠位部にかけて、より高くしていたことが考えられる。

3.4.2 上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方

上方向のやり速度は、準備局面ではほとんど 0m/s で推移しており、主に投てき局面において加速されていた(図 11)。上方向のやり速度に対する各動作要因の貢献の仕方に着目すると、L-on 前に体幹の左右傾の貢献が増大したものの、それとほぼ同時に上肢の上方回転が負に貢献していたため、この時点ではやりは上方向に加速されなかった。投てき局面中盤

では、上肢の上方回転の負の貢献が減少するにつれてやりが上方向に加速されはじめ、Rel前では上肢の上方回転と伸縮の貢献が増加することで、上方向のやり速度が高められていた。これらのことは、上方向のやり速度は主に体幹と上肢の動作によって獲得されていたことを示唆するものである。そして、以下には上方向のリリース速度の高かった選手の特徴を前方向と同様に検討した。

L-on 付近では、上方向のリリース速度の高い選手ほど、体幹の左右傾による貢献が高く（図 12 (C)）、上肢の上方回転による負の貢献が高かった（図 12 (E)）。この両者の相反する傾向は、上方向のリリース速度の高い選手ほど体幹が左傾するのに伴って、右肩の内転や水平外転、外旋動作が行われたために生じていたことが推察される。そこで、上方向のリリース速度の高かった者と低かった者の動作を比較するために、図 13 には上方向のリリース速度の低かった者（Subject A, 上方向のリリース速度：9.8m/s）と、高かった者（Subject B, 上方向のリリース速度：17.8m/s）の体幹セグメントと上肢セグメントを後方からみたステイックピクチャを示した。60–80%時の動作をみても、上方向のリリース速度の低かった Subject A では体幹セグメントと上肢セグメントがほぼ同時に上方に回転しているのに対して、上方向のリリース速度の高かった Subject B では上肢セグメントの位置が大きく変化せずに体幹セグメントが左傾していることが確認できる。このことは、上方向のリリース速度の高い選手ほど肩のラインに対してグリップをより下方に取り残す動作を行っていたことを示唆するものである。このときの右肩周りの筋群に着目すると、上方向のリリース速度の高い選手ほど筋がより大きく、速く伸長されていたことが推察される。また、Rel直前では上方向のリリース速度の高い選手ほど上肢の伸縮（図 12 (D)）および上方回転（図 12 (E)）による貢献が高かった。これらのことから、上方向のリリース速度の高い選手では、右肩周りの筋群が大きく引き伸ばされた後に即座に短縮することで大きな力発揮を可能にする、伸長—短縮サイクル（SSC）をより効果的に利用して、上肢の伸縮および上方回転による貢献を高めていたことが考えられる。また、本研究におけるやり速度に対する身体各部

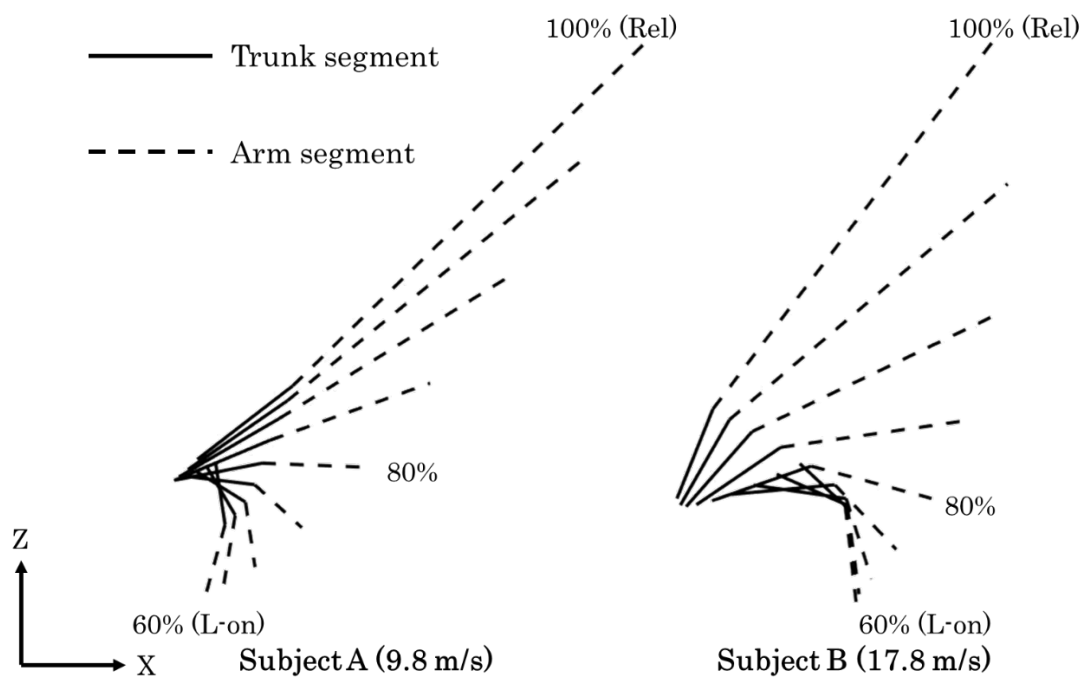


図 13 上方向のリリース速度の低かった者と高かった者における体幹セグメントと上肢セグメントのスティックピクチャ（後方からみたもの）

の貢献は、モデルにおける角速度とその回転中心からグリップまでの長さ（回転半径）の積によって決定される。そこで、上肢の上方回転による貢献と上方向のリリース速度との間で有意な正の相関関係の認められた局面（85–100%）における姿勢および関節運動をみると、第2章では、上方向のリリース速度の高い選手ほど、右肩の水平内転角速度が高いこと（図7(C)）、および右肘がより伸展位であること（図7(D)）が確認された。つまり、本章に示したやり速度に対する貢献が高いという結果は、高い角速度のほかにも、右肘が伸展位であることによって、上肢における回転半径が大きかったことに起因する可能性がある。このことを明らかにするために、本章では上方向のやり速度に対する上肢の上方回転による貢献を、角速度と回転半径とに分け、それぞれの時系列データと上方向のリリース速度との関係を検討した。その結果、上肢の上方回転による貢献に有意な相関関係が認められた局面（85–100%時）では角速度および回転半径の双方ともに上方向のリリース速度との間で有意な正の相関関係が認められた（図14）。このことは、上肢をより長い回転半径で回転させることは、より速く上方向に回転させることと同様に高い上方向のやり速度の獲得と関係していたことを示唆するものである。なお、このことには、右肘がより伸展位であったことのほかにも、そもそも上肢が長かったことも関係している可能性が考えられる。

L-on 前から Rel までの間では、上方向のリリース速度の高い選手ほど体幹長軸の屈曲による負の貢献が高かった（図12(B)）。このことは、上方向のリリース速度の高い選手ほど体幹の前傾や左傾などの動作によって、体幹をより速く下方に倒していたことを示唆するものである。このような動作は、モデルの評価としては上方向のやり速度をより減速させることになるため、パフォーマンスの向上に対して有益な動作とならないことが考えられる。しかしながら、やり投げでは記録の優れた者ほど投てき局面において体幹の起こし回転を効果的に引き起こしていたことや（野友ら, 1998）、Rel 時の体幹の前傾角速度が高かったこと（村上と伊藤, 2003）などが報告されている。また、投てき局面における姿勢について着目すると、記録の優れたやり投げ選手では右肩の水平外転角度が大きかったことや

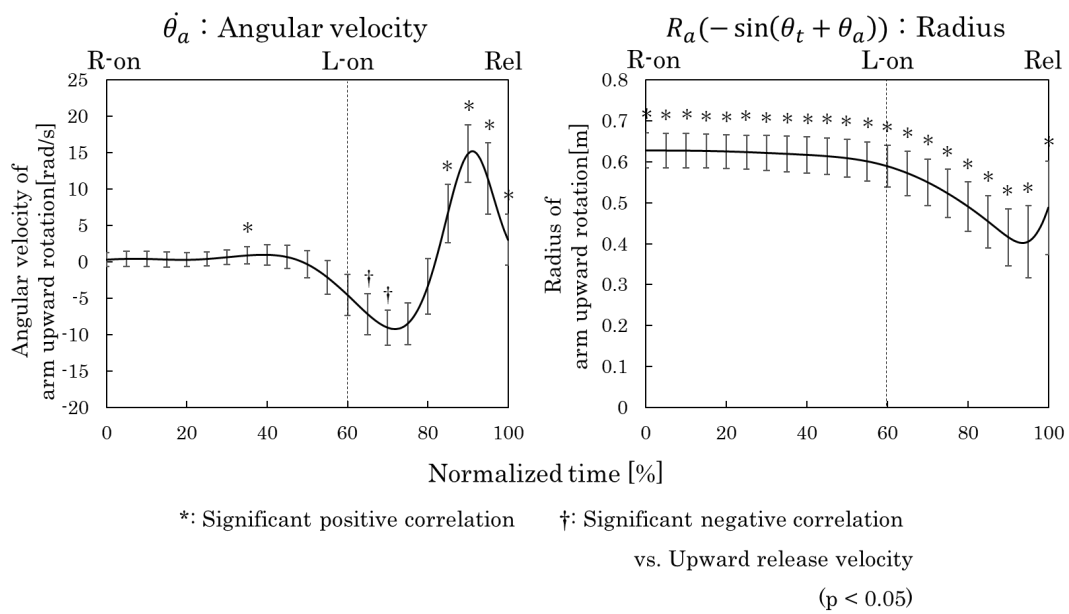


図 14 上方向のやり速度に対する上肢の上方回転による貢献の内訳と上方向のリリース速度との相関関係

(Makino et al., 2020), やりを体幹に対して大きく後方に残す姿勢をとっていたことが報告されている (Bartlett et al., 1996; 田内ら, 2012). これらのことを裏付けるように, 第 2 章では, 上方向のリリース速度の高い選手ほどグリップを体幹に対してより後方に位置させた姿勢から, 体幹の前傾角速度を高めることで, 上方向のリリース速度を高めていたことを確認した. このことから, 上方向のやり速度に対する体幹長軸の屈曲による貢献 (両股関節中点に対する両肩中心の相対速度) の度合いを負に高くすることは, グリップが体幹の後方に位置されている場合においては, 上肢の上方回転による貢献を高める動作となることが考えられ, より高い上方向のやり速度の獲得に繋がっていた可能性が推察される.

ここまで述べてきたように, 上方向のやり速度は主に体幹と上肢の動作によって獲得されており (図 11), これらの貢献を高めることがより高いリリース速度の獲得に重要であることが示された. しかしながら, 上方向のリリース速度の高い選手では, 体幹と上肢のみならず, Rel 前における下肢の貢献も高かった (図 12 (A)). このことは, 上方向のリリース速度の高い選手ほど左膝の伸展などの動作によってより速く全身を上方向に動かしていたことを示唆するものである.

3.5 概括

本章では、前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を明らかにするとともに、前および上方向のリリース速度の高い選手の特徴を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1. 前方向のやり速度は、準備局面では主に下肢によって獲得されており、投てき局面では下肢の貢献が減少するとともに体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転、上肢の水平回転および上肢の伸縮へと貢献の割合が高くなっていた。
2. 前方向のリリース速度の高い選手ほど、全ての局面を通して下肢の貢献が高く、L-on後の体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転、Rel 前の上肢の伸縮および上肢の水平回転の貢献が高かった。
3. 上方向のやり速度は、主に L-on 後の体幹の左右傾と Rel 前の上肢の伸縮および上肢の上方回転によって獲得されていた。
4. 上方向のリリース速度の高い選手ほど、投てき局面を通して体幹長軸の屈曲の負の貢献が高く、L-on 後の体幹の左右傾の正の貢献、および上肢の上方回転の負の貢献が高かった。そして、Rel 前では下肢、上肢の伸縮、および上肢の上方回転の貢献が高かった。

これらの結果は、やり投げに関する先行研究の結果と大きく矛盾しないことが確認されたことから、本章で用いたモデルはやり投げ選手の投てき動作を適切に評価できていたと考えられる。特に、やり投げにおいて上方向のやり速度が、全身のどのような動作によって獲得されていたのかはこれまで定量化されておらず、本章によってはじめて明らかとなった。

第4章 総合考察

本論文の目的は、やり投げにおける高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムを明らかにすることである。この目的を達成するために、以下の 2 つの研究課題について検討した。

1. やり投げにおけるリリース時の前および上方向のやり速度と関係する動作を明らかにする (第 2 章)
2. 時々刻々と変化する前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を明らかにする (第 3 章)

第 2 章では、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度との間において、有意な正の相関関係が認められた (図 4)。しかしながら、この相関関係は、本研究の対象者が多数であること、および初心者レベルから世界トップレベルまでの広範な記録を有していることに起因して生じた可能性が考えられる。そこで、本研究では両速度間の関係を、同程度の記録を有する選手内で確認するために、対象者の記録に基づいて 10m ごとに群分けし (50m 未満, 50–60m, 60–70m, 70–80m, 80m 以上)、各群内での相関関係を検討した。その結果、全ての群において、2 方向のリリース速度の間には負の相関関係が認められた (図 4)。そのなかでも、70m, 60m, 50m 台の選手では有意性が認められた。このことは、前方向と上方向のリリース速度との間には、一方が増加すれば他方は低下するという、いわゆるトレードオフの関係が存在することを示唆するものであった。第 1 章でも述べたように、やりを遠くに投げるためには、前および上方向のリリース速度の両者を同時に高めることで、適切な投射角度を維持しながら合成のリリース速度を高める必要があることを指摘したが、このことは、相反する 2 つの要因を同時に高めるという矛盾を内包していることが明らか

となった。

また、前および上方向のリリース速度は相互に影響していることが確認されたことから、それぞれと関係する動作を明らかにするためには 2 方向のリリース速度の間で生じる影響を排除した上で、検討する必要がある。そこで、第 2 章では前方向のリリース速度と動作との関係を確認する場合には上方向のリリース速度、上方向のリリース速度と動作との関係を確認する場合には前方向のリリース速度をそれぞれ制御要因とした偏相関係数を算出した。その結果、前および上方向のリリース速度に対する動作については、両者に関係する(動作) 要因、どちらか一方のみに関係する要因、および両者に相反して関係する要因が存在することが明らかとなった(図 5, 6, 7)。

これらの中で、両者に関係する要因、およびどちらか一方のみに関係する要因については、例えば、上方向のリリース速度と左膝の伸展角度との間に有意な正の偏相関が認められたことから(図 6(A))、左膝をより伸展位にすることで上方向のリリース速度の増加を狙うといったように、単純な解釈によって高いリリース速度の獲得に繋がることが考えられる。しかしながら、注目すべき点は、前および上方向のリリース速度に対して相反して関係する要因が存在したことである。具体的には、L-on 付近の体幹の後傾角度(図 5(B))であるが、この動作について、L-on 付近において体幹の後傾角度を大きくすることは高い上方向のリリース速度を獲得することに繋がるが、その一方で前方向のリリース速度を低下させてしまうことが考えられるということである。この点について、図 4 をみると、同程度の記録を有する選手のなかには、前方向に優れた者もいれば、上方向に優れた者もいることが確認できる。つまり、最適な投射角については、ある程度の幅が存在しているために、必ずしも前および上方向のリリース速度を同じ割合で増加させる必要はない。従って、パフォーマンス向上を目指す中で、個々の選手の特성에応じて、前および上方向のリリース速度のどちらを優先して高めるべきなのかを考慮し、獲得する動作を選択する必要があると考えられる。

以上のことから、第 2 章では、これまでのやり投げに関する研究において合成のリリー

ス速度が着目されてきたことに対して、リリース速度を前方向と上方向に分けて、それぞれと関係する動作を検討したことによって、やり投げ動作における新しい着眼点を提示することができた。

続いて、第 3 章では、時々刻々と変化する前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を評価した。一般的にやり投げに関する研究においては、パフォーマンスの優劣と関係する関節角度あるいは角速度を検討したものが多く、第 2 章においても、身体重心速度に加えて、左膝、体幹、右肩および右肘の角度および角速度に着目し、前および上方向のリリース速度との関係を検討した。その一方で、やり投げは全身運動であるため、本来であれば、下肢、体幹、上肢の全ての関節運動について、パフォーマンスの優劣と関連付けて検討する必要があると考えられる。しかしながら、前および上方向のリリース速度と関係する身体全ての関節における角度と角速度を検討した場合、考慮するデータの数が膨大となり、その解釈も困難となることが予想される。従って、やり投げのような全身運動においては、できるだけ単純化した形で動作のメカニズムを評価することが望まれる。また、身体運動における末端部の速度は、部分の角速度と長さ（回転半径）との積によって決定される。このことは、リリース速度と関係するやり投げ動作を評価するためには、第 2 章で示した角度および角速度のみならず、回転半径の大きさについても考慮する必要があることを示唆するものである。このことから、第 3 章では、田内ら（2006）の提案した下肢—体幹—上肢モデルを基にして、時々刻々と変化する前および上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を定量化した。

その結果、前方向のやり速度は、主に準備局面では下肢によって獲得されており、L-on 後では下肢の貢献が低下するとともに体幹の貢献が増加し、Rel 前では上肢の貢献が増加していたこと（図 9）、その一方で、上方向のやり速度は、準備局面ではほとんど速度を持っておらず、主に投てき局面における体幹と上肢の動作によって獲得されていたこと（図 11）が確認された。やり投げに関する先行研究では、前方向のやり速度に対する身体各部の貢献

の仕方について既に検討されており，本研究では先行研究（村上ら，2009；塚田ら，2014；田内ら，2008）と同様の結果が得られた．しかしながら，上方向のやり速度に対する身体各部の貢献の仕方はこれまで検討されておらず，本研究の第3章において初めて明らかとなった．

特に，第3章で評価したやり速度に対する身体各部の貢献の仕方は，身体各部の動作における角速度と回転半径の積によって評価されているため，高い前および上方向のリリース速度を獲得するためには，角速度と回転半径の両者，あるいは一方を高めることが求められる．そこで，第3章では上方向のやり速度に対する上肢の上方回転による貢献について，その内訳である角速度および回転半径と上方向のリリース速度との相関関係をそれぞれ検討したところ，上肢を速く上方に回転させること（角速度）と回転半径を大きくすることは，双方ともに高い上方向のリリース速度と関係していることが示された（図14）．このことは，高いやり速度を獲得するためには，上肢をより速く回転させるだけでなく，回転半径を大きくした状態で腕振り動作を行うという点を考慮する必要があることを示唆するものであった．つまり，第3章において角速度と回転半径の双方を考慮した，やり速度に対する身体各部の貢献の仕方を定量化したことによって，各動作要因における回転中心とグリップとの長さ（回転半径）を大きくする動作を行うこと，あるいはセグメントがそもそも長いことは，角速度を高めることと同様に，高いやり速度の獲得に直接的な影響を与える重要な要因であることが明らかとなった．

ここまで述べてきたように，本論文では一連のやり投げ動作について，第2章では関節における角度および角速度，第3章ではやり速度に対する身体各部の貢献の仕方を検討した．これらの研究は，第1章において指摘した問題点を解決するために行われたものであるが，本論文全体での目的は，高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムを明らかにすることである．そこで，図15および図16には，第2章および第3章の結果から得られた，前および上方向のリリース速度と関係する主な要因をやり投げの時系列に

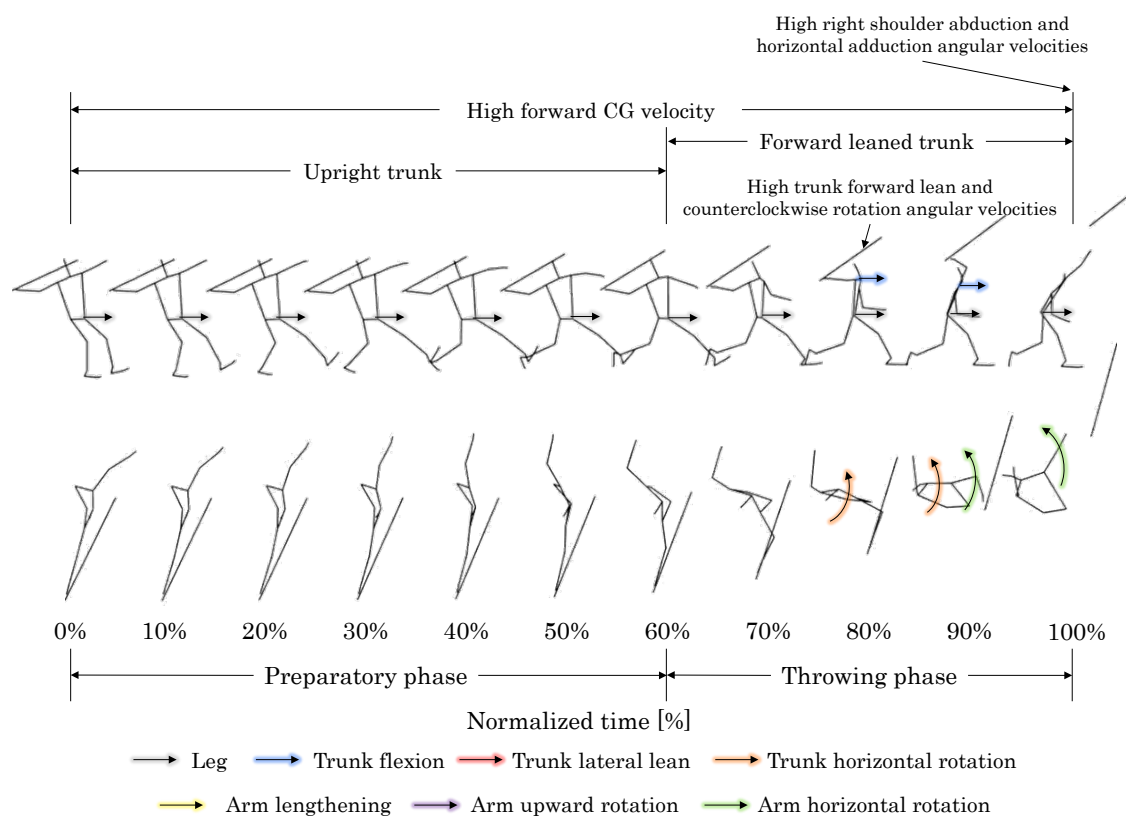


図 15 より高い前方向のリリース速度を獲得するためのメカニズム

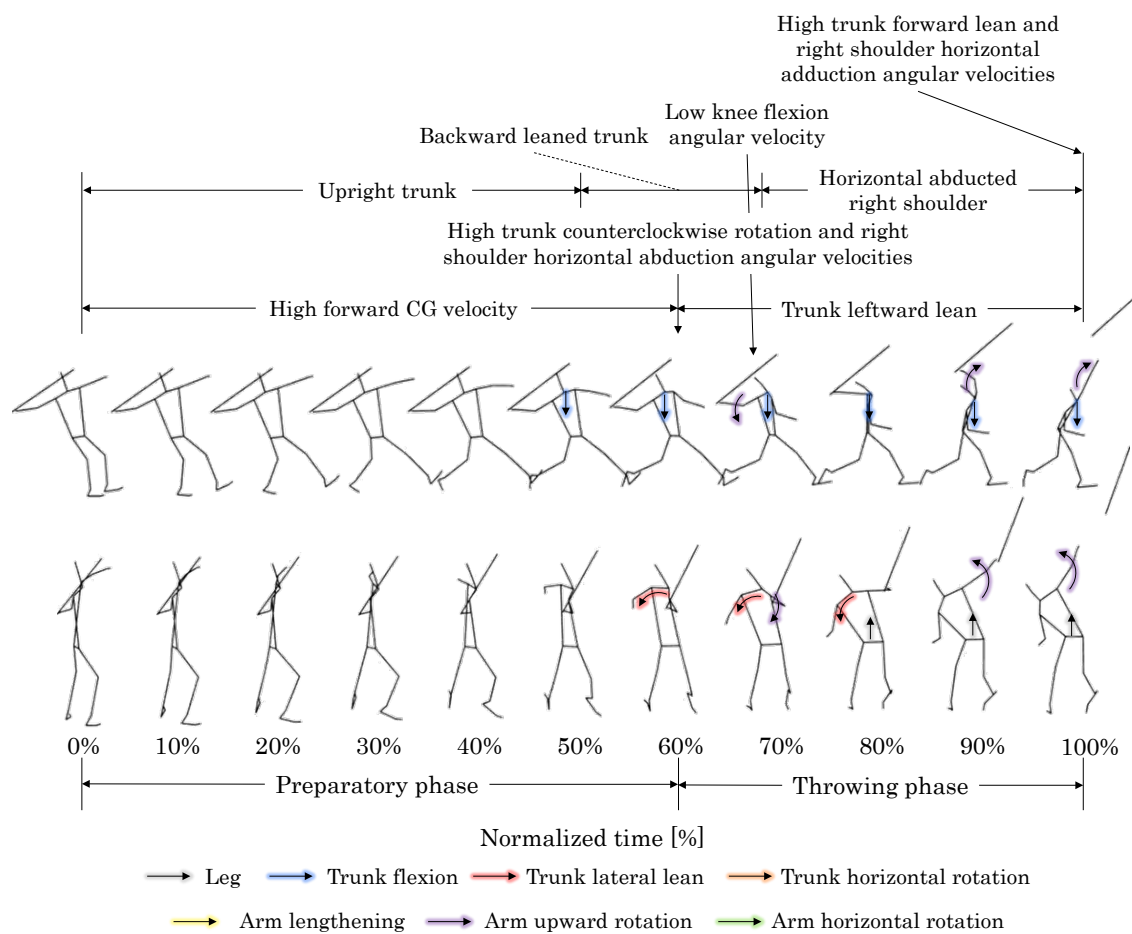


図 16 より高い上方向のリリース速度を獲得するためのメカニズム

沿って図示した。以降ではこれらの結果を基にして、高い前および上方向のリリース速度を獲得するメカニズムについて考察する。

(1) より高い前方向のリリース速度を獲得するためのメカニズム (図 15)

まず、準備局面では、体幹が直立位に近く、身体重心の前方速度が高いことに併せて、前方向のやり速度に対する下肢の貢献が高いことが、高い前方向のリリース速度の獲得に関係していた。これらのことから、助走を速く走るとともに体幹の後傾を小さくし、準備局面における身体重心速度の減速を小さくすることが、より高い前方向のリリース速度を獲得するために有利な動作となることが考えられる。また、下肢の貢献および身体重心の前方速度が高いことは、準備局面のみならず、投てき局面においても高い前方向のリリース速度の獲得に関係していた。つまり、全ての局面において全身がより速く動くことが、前方向のやり速度を高める要因となることが考えられる。

また、投てき局面では体幹の前傾および左回旋の角速度が高いこと、体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転による貢献が高いことが、高い前方向のリリース速度の獲得と関係していた。やり投げに関する先行研究では、体幹の角速度が高いことは右肩周りの筋群における SSC をより効果的に引き起こす動作となると考えられており (田内ら, 2009), 第 2 章においても同様の考察を行った。しかしながら、角速度のみならず、体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転による貢献を高めることが高い前方向のリリース速度と関係していたということは、体幹の動作は右肩周りの筋群をより速く引き伸ばすことのほかにも、前方向のやり速度を高める役割も果たしていたことを示唆するものであった。

さらに、Rel 前では、体幹が前傾位であるとともに右肩の外転および水平内転の角速度が高いこと、および上肢の水平回転による貢献が高いことがより高い前方向のリリース速度の獲得と関係していた。このことから、体幹が前傾した姿位から、右肩をより速く外転および水平内転させることは、上肢を水平面内においてより速く回転させる動作となり、結果と

して高い前方向のリリース速度の獲得に繋がるものと考えられる。

(2) より高い上方向のリリース速度を獲得するためのメカニズム (図 16)

上方向のやり速度は主に投てき局面以降の体幹と上肢の動作によって高められていたため、準備局面ではいずれの貢献においても高い上方向のリリース速度の獲得と関係しなかった。それにもかかわらず、準備局面では身体重心の前方速度が高く、体幹が直立位であることがより高い上方向のリリース速度の獲得と関係していた。この動作は、上方向のやり速度を直接的に高める動作とはならないものの、やり投げでは L-on 後に全身の保持する力学的エネルギーをやりへと伝達させることが報告されている (Morriss et al., 2001)。従って、準備局面において身体重心の前方速度を高めることで全身の保持する力学的エネルギーを大きくしておくことが、投てき局面以降における体幹および上肢の貢献を高める要因となることが考えられる。

次に、L-on 後では体幹の後傾および左傾角度が大きく、体幹の左回旋および右肩の水平外転角速度が高いこと、これらの加えて体幹の左右傾による正の貢献および上肢の上方回転による負の貢献が高いことが、高い上方向のリリース速度の獲得と関係していた。Makino et al. (2020) は、L-on 付近における体幹の左回旋角度と右肩の水平外転角度の変化パターンが同様であることから、右肩の水平外転は、体幹の左回旋に起因する運動依存力 (阿江と藤井, 2002) によって生じたことを示唆している。つまり、体幹が後傾および左傾した姿位から体幹の左回旋角速度を高め、それにより右肩がより速く水平外転したことが、体幹の左右傾による正の貢献、および上肢の上方回転による負の貢献を高める要因となったと考えられる。この動作は、同じ時点における上方向のやり速度を高める動作とはならないものの、右肩周りの筋群をより速く伸長させる動作となることから、右肩周りの筋群における SSC の効果的な利用を促していたものと考えられる。

また、Rel 前では体幹の左傾角度が大きく、右肩の水平内転角速度が高いこと、および上

肢の上方回転による貢献が高いことが、高い上方向のリリース速度の獲得と関係していた。このことは、体幹を左傾させた姿勢から右肩の水平内転角速度を高めることが、上肢をより速く上方向に回転させる動作となり、高い上方向のリリース速度の獲得に貢献していたと考えられる。

さらに、高い上方向のリリース速度の獲得には L-on 後の左膝の屈曲角速度が低いこと、Rel 時における右肩の水平外転角度が大きいこと、および体幹の前傾角速度が高いことも関係していた。やり投げでは L-on 後に左膝を伸展位に維持する（屈曲角速度を低くする）ことが、体幹の並進運動を効果的に回転運動に変換させる役割を持つと考えられている（村上と伊藤, 2003）。また、第 2 章では、右肩の水平外転を大きくすることでやりのグリップを体幹に対して後方に位置させ、その姿勢から体幹の前傾角速度を高めることが、やりをより速く上方向に動かす動作となることを考察した。これらのことから、高い身体重心速度を保持した状態で左足を接地し、その際に左膝を伸展位に維持することが、その後の体幹の前傾角速度を高めることに繋がり、この動作が上肢の上方回転による貢献を高めるために役立てられていたことが考えられる。加えて、投てき局面における左膝が伸展位であること、および下肢の貢献が高いことは、より高い上方向のリリース速度の獲得と関係していた。

Bartlett et al. (1996) は、投てき局面において左膝を伸展位にすることが、助走によって獲得した前方向の身体重心速度を効果的に上方向へと変換し、結果としてやりの上方速度を高める役割を持つと考察している。本論文では Bartlett et al. (1996) の考察と同様の結果が得られており、より高い身体重心速度を保持した状態で左足を接地し、その後に左膝をより伸展位に維持することで、左脚全体の起こし回転を引き起こし (Makino and Tauchi, 2022)、下肢の貢献を高めていたと考えられる。

以上のことから、本論文ではやり投げにおけるより高い前および上方向のリリース速度を獲得するためのメカニズムを明らかにすることができた。本論文で得られた知見は、これ

までのやり投げに関する先行研究において着目されてきた、合成のリリース速度を高めるための動作が、前および上方向のリリース速度のうち、どの方向と強く関係するのかを整理するために有益な知見となる。例えば、高い合成のリリース速度を獲得するためには、R-on時、およびL-on時における身体重心速度が高いこと (Bartlett et al., 1996; Murakami et al., 2006; 田内ら, 2012; Murakami et al., 2017), および準備局面における体幹が直立位に近いこと (Bartoniets, 2000; 野友ら, 1998) が重要であるとされているが、本論文の第2章では、これらの動作が高い前および上方向のリリース速度の両者と関係することを確認した (図 5 (A), 図 6 (B), (C)). また、記録の優れた選手ではL-on時の左膝が伸展位であることが報告されており (Bartlett et al., 1996; 野友ら, 1998; 村上と伊藤, 2003), このことについて、本論文の第2章では、左膝をより伸展位にすることが高い上方向のリリース速度と関係することを示した (図 5 (A)). さらに、記録の優れた選手は劣った選手よりも、L-on時に右腰とグリップとの水平距離を大きくすることや (Bartlett et al., 1996), 右肩の水平外転角度を大きくすることで (Makino et al., 2020), 右肩周りのSSCを効果的に利用していたと考察されている (Mero et al., 1994; Tauchi et al., 2009). このことについて、第2章では前および上方向の両者において、右肩周りの筋群におけるSSCを効果的に利用する重要性を示唆した。しかしながら、第3章の結果を確認すると、上方向のやり速度に対する上肢の上方回転による負の貢献が高いことは、高い上方向のリリース速度と関係していたが (図 12 (E)), 前方向のやり速度に対する上肢の負の貢献は極めて小さかった (図 9). このことから、右肩周りの筋群のSSCを効果的に利用することは、特に上方向のリリース速度を高めるために重要な役割を果たすものと考えられる。加えて、記録の優れた選手では、Rel時における体幹の前傾角速度が高いことが報告されている (Murakami et al., 2006). このことについて、本論文の第2章では、Rel時における体幹の前傾角速度が高いことは、高い上方向のリリース速度と関係することを確認している (図 6 (A)). これらのことから、本論文では合成のリリース速度を高めるための動作として報告されてきた先行研究の知見

が、どの方向のリリース速度を高める動作であるのかを整理することができた。こうした観点は、やり投げ動作のトレーニングにおいて、前および上方向のリリース速度を高めるために、どの動作に焦点を当ててアプローチするのかを選択する際に役立つ知見となると考えられる。

現場への示唆

先述の通り、やり投げでは至適な投射角で高い合成のリリース速度を獲得することがパフォーマンス向上に繋がる。このことを達成するためには、前および上方向のリリース速度の双方を同時に高める必要があるが、本論文では 2 方向のリリース速度との間にトレードオフの関係が存在することが明らかとなった。このことは、やり投げでは前および上方向のリリース速度のうち、一方の速度が高まったとしても他方の速度は低下してしまう可能性が高い点を考慮して日々のトレーニングに取り組む必要があることを示唆するものである。

また、やり投げのトレーニング現場では上肢の“しなり”を大きくすることが重要視されているようである（田内ら，2009）。この動作は体幹に対して上肢が後方に残された状態を指しており、この際に右肩周りの筋群は大きく引き伸ばされる。その後、しなりを解放すると同時に筋群が短縮する SSC が強制的に利用されることにより、やりを大きく加速できるため、上肢のしなりを大きくすることは高いやり速度の獲得に有利であると考えられている。この点について、本論文では右肩周りの筋群の SSC を効果的に利用することは、特に上方向のリリース速度を高めるために重要な動作であることを示唆した。こうしたように本論文で得られた知見は、やり投げのトレーニング現場で重要とされてきた動作が前および上方向のリリース速度のどちらを高める要因であるのかを整理し、適切な技術指導に利用されることが望まれる。

研究の限界

最後に、本論文には限界が存在する。本論文における結果は、前および上方向のリリース速度と各種バイオメカニクス変数との相関関係を検討することで、高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムを検討した。しかしながら、やり投げではそれぞれの動作が独立してやり速度を高めているわけではなく、多数の動作が相互に影響しあうことで、最終的に前および上方向のリリース速度が高められる。つまり、一連のやり投げ動作において、前および上方向のやり速度が高まる技術構造に関して、より詳細な洞察を得るためには、前および上方向のリリース速度と各種バイオメカニクス変数との相関関係だけでなく、動作間の相関関係についても検討する必要があると考えられる。このことを明らかにするためには、パス解析や構造方程式モデリングなどの統計的手法を用いて評価する必要がある。

第5章 総括

本論文では、初心者レベルから世界トップレベルまでの男子やり投げ選手を対象として、やり投げにおける高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムについて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1. 同程度の記録を有する選手間では、前方向のリリース速度と上方向のリリース速度との間で、負の相関関係が認められた。(第2章)
2. 準備局面における身体重心の前方速度は、前および上方向のリリース速度の高い選手に共通して高かった。(第2章)
3. L-on 時における体幹の後傾角度は、前方向のリリース速度の高い選手ほど直立位に近く、上方向のリリース速度の高い選手ほどより後傾位であった。(第2章)
4. Rel 時では、前方向のリリース速度の高い選手ほど右肩の外転および水平内転角速度が高く、上方向のリリース速度の高い選手ほど体幹の前傾および右肩の水平内転角速度が高かった。(第2章)
5. 前方向のやり速度は、準備局面では主に下肢によって獲得されており、L-on 後では体幹長軸の屈曲および体幹の水平回転、Rel 前では上肢の伸縮および上肢の水平回転が大きく貢献していた。(第3章)
6. 上方向のやり速度は、主に L-on 後の体幹の左右傾と Rel 前の上肢の伸縮および上肢の

上方回転によって獲得されていた。(第3章)

以上の結果から、やり投げでは前方向のリリース速度と上方向のリリース速度との間にはトレードオフの関係が存在すること、それに加えて、高い前および上方向のやり速度を獲得するためのメカニズムは、それぞれ異なることが明らかとなったことから、高い前および上方向のやり速度を獲得するメカニズムには異なる点が存在するという本論文の仮説が支持された。これらのことから、やり投げでは前方向のやり速度を高める動作と、上方向のやり速度を高める動作を一纏めにせず、個々に考慮する必要があることが示唆された。本論文で得られた知見は、やり投げ選手が単に合成のリリース速度を高めるだけでなく、約 30°の適切な投射角度を維持しながらリリース速度を高めるために役立つ知見となることが期待される。

参考文献

- 阿江通良・藤井範久 (2002) スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店: 東京, 126–130.
- 阿江通良・湯海鵬・横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. バイオメカニズム, 11: 22–33.
- Bartlett, R., Müller, E., Lindinger, S., Brunner, F. and Morriss, C. (1996) Three-dimensional evaluation of the kinematic release parameters for javelin throwers of different skill levels. *Journal of Applied Biomechanics*, 12: 58–71.
- Bartlett, R. and Best, R. (1988) The biomechanics of javelin throwing: A review. *Journal of Sports Sciences*, 6(1): 1–38.
- Bartonietz, K. (2000) Javelin Throwing: an Approach to Performance Development. In V. M. Zatsiorsky (ed.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (pp. 401–434).
- Best, R.J. and Bartlett, R.M. (1988) Computer flight simulation of the men's new rules javelin. In G. de Groot, A.P. Hollander, P.A. Huijing, and G.J. van Ingen Schenau (Eds.), *Biomechanics XI-B*, 588–594.
- Campos, J., Brizuela, G. and Ramón, V. (2004) Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 19: 47–57.
- Chu, S., Jayabalan, P., Kibler, W.B. and Press, J. (2016) The kinetic chain revisited: new concepts on throwing mechanics and injury. *Pm&r*, 8(3): 69–77.
- Fleisig, G.S., Bolt, B., Fortenbaugh, D., Wilk, K.E. and Andrews, J.R. (2011) Biomechanical comparison of baseball pitching and long-toss: implications for training and rehabilitation. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 41(5): 296–303.

- Hay, J.G. (1993) *The biomechanics of sports techniques -fourth edition-*, Prince Hall, New Jersey, 495.
- Hubbard, M. and Alaways, L.W. (1987) Optimum release conditions for the new rules javelin. *Journal of Applied Biomechanics*, 3(3): 207–221.
- Jöris, H.J.J., Van Muyen, A.E., van Ingen Schenau, G.J. and Kemper, H.C.G. (1985) Force, velocity and energy flow during the overarm throw in female handball players. *Journal of Biomechanics*, 18(6): 409–414.
- 小林育斗・阿江通良・宮崎明世・藤井範久 (2012) 優れた投能力を持つ小学生の投動作の特徴とその標準動作, *体育学研究*, 57: 613–629.
- Komi, P.V. and Mero, A. (1985) Biomechanical analysis of Olympic javelin throwers. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1: 139–150.
- Liu, H., Leigh, S. and Yu, B. (2014) Comparison of sequence of trunk and arm motions between short and long official distance groups in javelin throwing. *Sports Biomechanics*, 13(1): 17–32.
- Łysoń-Ukłańska, B., Błażkiewicz, M., Kwacz, M. and Wit, A. (2021) Muscle force patterns in lower extremity muscles for elite discus throwers, javelin throwers and shot-putters—a case study. *Journal of Human Kinetics*, 78(1): 5–14.
- 前田正登・野村治夫・柳田泰義・宮垣盛男 (1997) 人間の動きを考慮に入れたヤリの最適投射条件. *デサントスポーツ科学*, 17: 270–277.
- Makino, M., Hatakeyama, S. and Ae, M. (2020) An analysis of the throwing technique of college male javelin throwers in a competition. *ISBS Proceedings Archive*, Vol. 38: Iss. 1, Article 147.
- Makino, M., Tauchi, K. (2022). Kinematic contribution of the lower limb to vertical javelin velocity in male javelin throwers. *ISBS Proceedings Archive*, Vol. 40: Iss. 1,

Artucle 97.

Mero, A., Komi, P.V., Korjus, T., Navarro, E. and Gregor, R.J. (1994) Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *Journal of Applied Biomechanics*, 10: 166–177.

宮西智久・藤井範久・阿江通良・功力靖雄・岡田守彦（1995）大学野球選手における速投および遠投動作の3次元比較研究，*体育学研究*，40: 89–103.

Morriss, C. and Bartlett, R. (1996) Biomechanical factors critical for performance in the Men's javelinthrow. *Sports Medicine*, 21: 438–446.

Morriss, C., Bartlett, R. and Navarro, E. (2001) The function of blocking in elite javelin throwers: a re-evaluation. *Journal of Human Movement Study*, 41: 175–190.

村上雅俊・伊藤章（2003）やり投げのパフォーマンスと動作の関係．*バイオメカニクス研究*，7: 92–100.

Murakami, M., Tanabe, S., Ishikawa, M., Isolehto, J., Komi, P.V. and Ito, A. (2006) Biomechanical analysis of the javelin at the 2005 IAAF World Chanpionships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 21: 67–80.

Murakami, M., Tanabe, S., Ishikawa, M. and Ito, A. (2017) The relationship between approach run kinematics and javelin throwing performance. *Asian Journal of Coaching Science*, 1: 1–14.

村上幸史・田内健二・遠藤俊典・村上雅俊・本道慎吾・畑瀬聡（2009）男子やり投日本トップ選手における投てき動作の縦断的評価．*陸上競技学会誌*，7(1): 18–26.

野友宏則・富樫時子・阿江通良（1998）記録水準の異なる選手のやり投げ動作に関するキネマティクスの研究．*陸上競技研究*，32: 32–39.

島田一志・阿江通良．藤井範久・川村卓・高橋佳三（2004）野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ．*バイオメカニクス研究*，8(1): 12–26.

- 瀧川寛子・田内健二 (2020) やり投げの投てき記録に影響を及ぼす動作要因における男女差の検討. 体育学研究, 65: 143–152.
- 瀧川寛子・堀内元・田内健二 (2020) 女子やり投げ競技者における成功試技と失敗試技とが生じる動作要因の検討. 体育学研究, 65: 143–152.
- 田内健二 (2009) バイオメカニクスの知見を背景にした男子やり投げの投てき技術: レビュー. 陸上競技学会誌, 7: 33–39.
- 田内健二・藤田善也・遠藤俊典 (2012) 男子やり投げにおける投てき動作の評価基準. バイオメカニクス研究, 16(1): 2–11.
- 田内健二・村上雅俊・遠藤俊典・阿江通良 (2008) 世界一流男子やり投選手における技術分析—槍速度に対する身体各部位の貢献について—. 陸上競技研究紀要, 4: 120–123.
- Tauchi, K., Murakami, M., Endo, T., Takesako, H. and Gomi, K. (2009) Biomechanical analysis of elite javelin throwing technique at the 2007 IAAF World Championships in Athletics. 陸上競技研究紀要, 5: 143–149.
- 田内健二・村上雅俊・高松潤二・阿江通良 (2006) 砲丸投げにおける砲丸速度に対する身体各部位の貢献—世界レベル選手と日本トップレベル選手との比較—. 陸上競技研究紀要, 2: 65–73.
- 田内健二・村上幸史・藤田善也・磯繁雄 (2009) やり投の日本トップ選手における動作分析データの活用事例—世界トップレベルとの相違点を提示して—. スポーツパフォーマンス研究, 1: 151–161.
- 塚田卓巳・佐分慎弥・田内健二 (2014) U-19 日本トップレベルの女子やり投選手における投てき動作の特徴—斉藤真理菜選手と梶原美波選手との比較—. 陸上競技研究紀要, 10: 118–121.
- Whiting, W.C., Gregor, R.J. and Halushka, M. (1991) Body segment and release parameter contributions to New-rules javelin throwing. International Journal of

Sport Biomechanics, 7: 111–124.

謝辞

本学位論文は、中京大学スポーツ科学部の田内健二教授のご指導のもとで作成されました。田内先生には研究指導のみならず、科学的知見に基づいたコーチングやトレーニングなど、スポーツ現場での立ち振る舞いについても非常に多くのことをご教授いただきました。私がやり投げ選手として活動していた頃から目標としていた先生のもとで博士論文を執筆できたことは、私にとって貴重な財産です。ここに厚く御礼申し上げます。

大家利之准教授と藤林献明准教授には、本論文の副査を引き受けていただきました。大家先生には、日ごろから研究の進捗について気にかけていただくとともに、本論文に関して他分野ならではの貴重なご指摘をいただきました。藤林先生には、データの解釈について本論文を完成させるうえで有意義なご助言をいただきました。また、投稿論文の執筆および就職活動に関するご相談にも乗っていただきました。心より御礼申し上げます。

中京大学陸上競技部の部員の皆様には、データ収集に際して多大なるお力添えをいただきました。ここに厚く御礼申し上げますとともに、陸上競技部の今後の益々のご活躍を祈念いたします。

中京大学大学院スポーツ科学研究科応用スポーツ科学系の先輩方、大学院生の皆様には、データ収集や分析、さらにはその解釈に関して手厚いご支援をいただきました。感謝申し上げます。

最後に、大学院での生活を支援し、静かに温かく見守ってくれた家族に心より感謝します。

2024年1月 牧野 瑞輝