

国内女子砲丸投競技者における回転投法の投動作

加藤 忠彦¹⁾ 山本 大輔²⁾ 前田 奎³⁾ 牧野 瑞輝⁴⁾ 山下 直紀⁵⁾ 庄司 一眞⁶⁾ 安藤 優香⁶⁾
中嶋 日向子⁶⁾ 瀧川 寛子⁷⁾

1) 湘南工科大学 2) 天理大学 3) 京都先端科学大学 4) 国立スポーツ科学センター
5) 日本体育大学大学院 6) 中京大学 7) 中部学院大学

はじめに

女子砲丸投における投法は、国際レベルでは回転投法が主流になりつつあり、近年の国際大会における上位入賞者の多くが回転投法を用いている。国内の女子競技者においては、依然としてグライド投法が主流ではあるものの、回転投法を用いた競技者も増加傾向にある。歴史的にみて、女子砲丸投は世界選手権とオリンピックに出場経験がある種目であるが、再び世界に挑戦する上では、国内における競技レベルの向上や日本記録の更新は不可欠である。国際レベルの動向を踏まえても、そのためには回転投法への積極的な挑戦は求められるだろう。その上で、現時点での国内女子競技者における回転投法の特徴を把握することは、トレーニングや指導の指針として有益であると考えられる。

本稿では、国内女子競技者における回転投法に焦点をあて、男子トップレベルの競技者との比較を交えることで、事例的にその動作の特徴を検討することとした。

方法

対象者と分析試技

第108回日本選手権および第18回U18陸上競技大会の女子砲丸投出場者の中から、回転投法を用いていた競技者3名(以下、W1-3)を対象とした。なお、W1は第108回日本選手権で2位、W2は9位、W3はU18陸上競技大会で5位であった。また、比較対象は、第108回日本選手権における男子砲丸投優勝者(以下、M)とした。本稿では各対象者の最も記録が良かった1試技ずつを分析対象とした。

データ収集

投てき方向を前方として、日本選手権では右斜め前方、後方、左側方の3か所から、U18陸上競技大会では右斜め前方と右斜め後方の2か所から、デジタルビデオカメラ(DC-GH6, Panasonic社製, 240fps, シャッタースピード1/2500s; FDR-AX45, Sony社製, 120fps, シャッタースピード1/1000s)で撮影した。また、撮影範囲内に日本選手権では9か所、U18陸上競技大会では5か所にキャリブレーションポールを立て、予め撮影した。

データ処理

撮影された映像から、動画解析ソフト(Frame-DIAS6, Q'sfix社製)を用いて身体4点(左右肩峰, 左右大転子)および砲丸1点を120Hzでデジタル化し、3次元DLT法により分析点の3次元座標値を取得した。2方向あるいは3方向からの映像は、砲丸がリリースされたコマで同期した。なお、投てき方向をY軸、Y軸に対して左右方向をX軸、鉛直方向をZ軸とした。算出された3次元座標値は、残差分析法によって遮断周波数(6.84-13.56 Hz)を決定し、4次のButterworth low-pass filterで平滑化した。

分析項目

本稿では、図1に示すように回転投法の動作に分節点を設け、特に砲丸の加速に影響する投動作とその前段階に焦点を当てた。準備局面(ターン)後の右足接地(R-on)から左足接地(L-on)までを片脚支持局面(SSP)、L-onからリリース(Re1)までを両脚支持局面(DSP)として分析範囲とした。投てき動作に関する変数は以下の通りとした(加藤ほか, 2021)。

(1) リリースパラメータ: 初速度(Relにおける砲丸の合成速度), 投射高(Relにおける砲

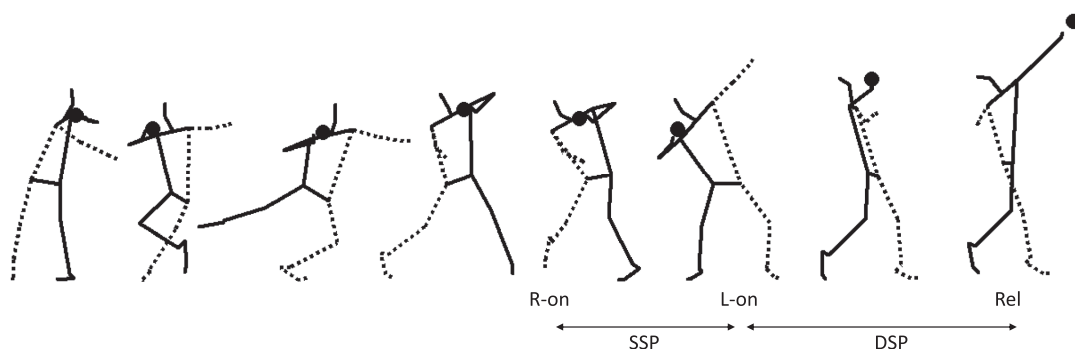


図1 回転投法のスティックピクチャと局面分け

表1 対象者の記録とリリースパラメータ

	記録 [m]	初速度 [m/s]	投射角度 [deg]	投射高 [m]
W1	15.45	11.68	33.94	2.01
女子競技者 W2	14.07	11.10	37.22	1.90
W3	12.26	10.14	38.95	1.84
男子競技者 M	18.53	12.90	34.13	2.29

丸のZ座標値), 投射角度 (Relにおける砲丸の速度ベクトルが水平面となす角)

- (2) 砲丸の累積移動距離 (R-onを起点とした砲丸の移動距離)
- (3) 肩水平回転角度: 左肩峰から右肩峰に向かうベクトルが水平面でY軸となす角度
- (4) 腰水平回転角度: 左大転子から右大転子に向かうベクトルが水平面でY軸となす角
- (5) 体幹捻転角度: 肩水平回転角度と腰水平回転角度の差分 (右肩が右腰を追い越した状態を正, 右腰が右肩を追い越した状態を負)
- (6) 体幹前後傾角度: 左右大転子の midpoint から左右肩峰の midpoint に向かうベクトルが矢状面でZ軸となす角度 (投てき方向に傾いた状態を正, 投てき方向と逆側に傾いた状態を負)
- (7) 体幹と砲丸の距離: 両肩 midpoint と砲丸の距離

なお, 分析項目の時系列データは, SSP と DSP の動作の所要時間同程度であったことから, 右足接地を0%, 左足接地を50%, リリースを100%として規格化した。

結果および考察

リリースパラメータと砲丸の合成速度に関して

分析対象の記録とリリースパラメータは表1に示した通りである。初速度は女子競技者・男子競技者に関わらず, 高いほど記録が高くなっていた。投射角度は女子競技者において記録が低いほど大きくな

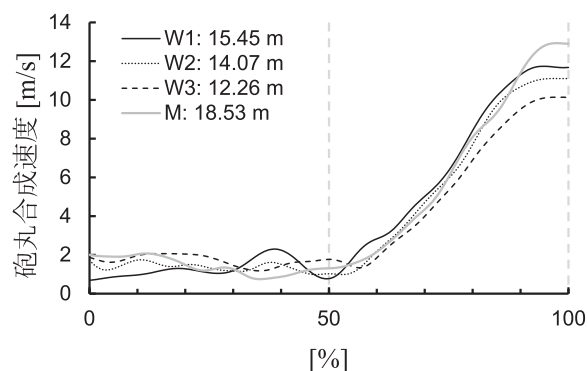


図2 砲丸合成速度の時系列データ

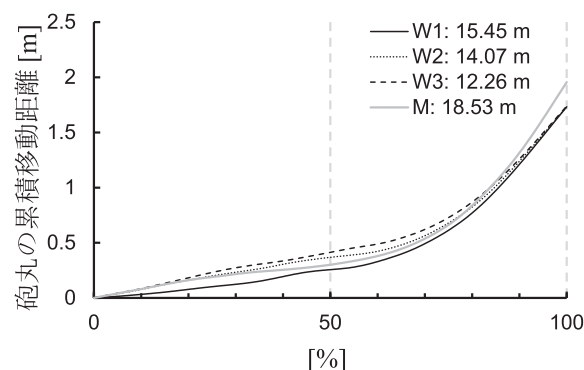


図3 砲丸の累積移動距離の時系列データ

る傾向にあった。また, 記録が最も高いW1はMと同程度だった。投射高に関しては, 初速度と同様に高いほど記録も高くなっていた。砲丸の質量に関わらず, その飛距離はリリースパラメータで決定され, その中でも初速度が与える影響が最も大きい (Hay, 1985)。つまり, 女子競技者間の記録, および男子競技者と比較した場合の記録の差異は初速度の差によってもたらされたといえる。

図2は, 対象者における砲丸の合成速度の時系列データである。SSPにおける合成速度の波形には対象者間で一貫性はなかった。DSPの始まりであるL-onにおける合成速度は, 女子競技者においてW1は0.77 m/sであり, W2は1.02 m/s, W3は1.78m/sであり, 記録と初速度が高い競技者ほど, 低値で

表 2 砲丸の累積移動距離，肩水平回転角度，腰水平回転角度，体幹捻転角度，体幹前後傾角度の変化量

		累積移動距離 [m]		肩水平角度 [deg]		腰水平角度 [deg]		体幹捻転角度 [deg]		体幹前後傾角度 [deg]	
		SSP	DSP	SSP	DSP	SSP	DSP	SSP	DSP	SSP	DSP
女子競技者	W1	0.26	1.48	76.02	240.30	117.65	132.50	-41.62	107.80	9.99	24.88
	W2	0.37	1.36	142.81	225.54	162.86	154.64	-20.05	70.90	-3.83	22.03
	W3	0.41	1.33	135.31	235.06	149.65	158.82	-14.33	76.24	-2.65	18.97
男子競技者	M	0.30	1.66	130.62	254.02	124.10	162.82	6.52	91.20	-16.91	29.61

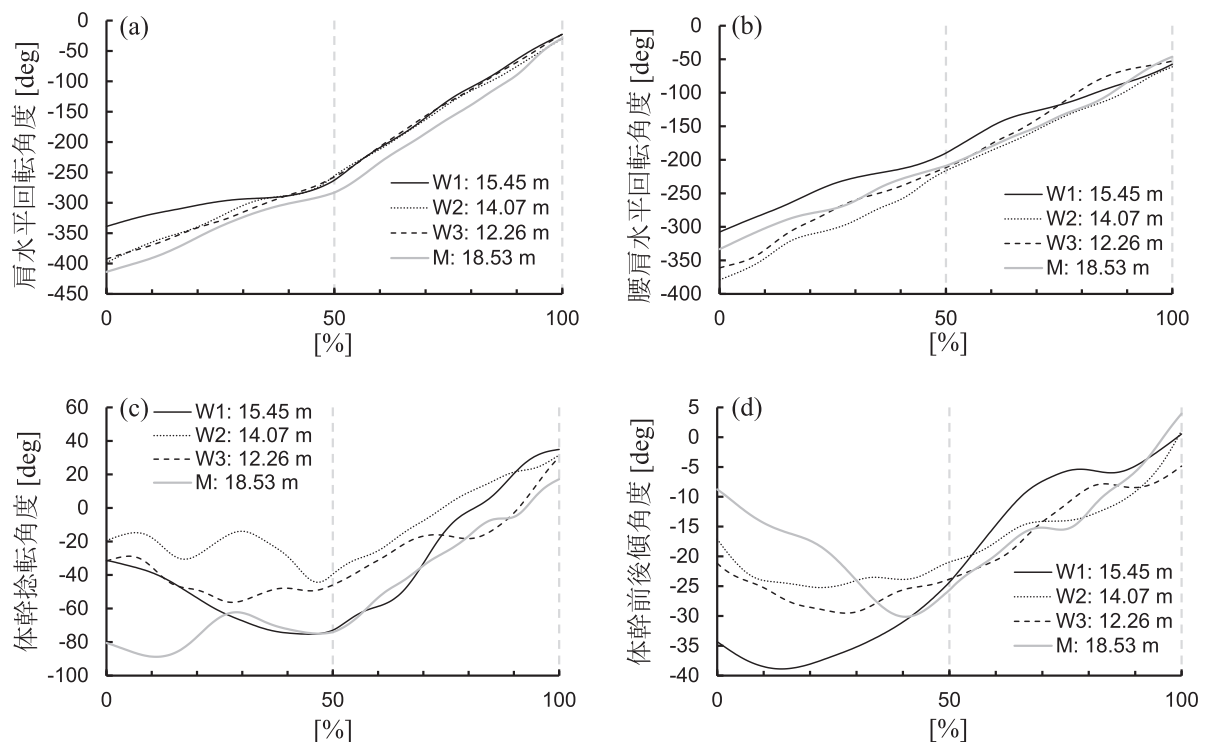


図 4 体幹に関する変数の時系列データ

あった。しかし、Mは1.31 m/sであったことから、L-onにおける砲丸の合成速度よりも、むしろDSPにおいてリリースに至るまでにどのように砲丸が加速されたかが、最終的な初速度の差になったと考えられる。以下、初速度及びDSPにおける砲丸の加速に各変数がどのように影響したかを考察していく。

砲丸の累積移動距離に関して

次に、図3は、砲丸の累積移動距離を示している。女子競技者においては、分析区間における最終的な累積移動距離が概ね一致していた(1.73-1.74 m)。一方、Mにおいては1.96 mであり、女子競技者よりも約0.2 m長かった。表2に示した、SSP1およびDSPにおける累積移動距離をみると、女子競技者においてSSPにおける累積移動距離は、記録が高いほど短かった。また、男女に関わらず、特にDSPにおける累積移動距離が長い程、記録も高かった。男子競技者においてDSPにおける砲丸の累積移動距

離の増大は、砲丸速度の増大に影響する(Kato et al., 2024)。つまり、女子競技者においても、DSPにおいてより長い累積移動距離を獲得することが、砲丸の加速、つまり最終的な初速度の増大に重要である可能性が示された。一方、詳細なメカニズムは分からないが、SSPにおいて砲丸の累積移動距離を短くすることは、女子競技者に特有の重要な要素である可能性がある。

肩・腰水平回転角度と体幹捻転角度，体幹前後傾角度に関して

図4は体幹に関する変数の時系列データを示している。図4-aは肩水平回転角度の、図4-bは腰水平回転角度の時系列データをそれぞれ示しており、0 degがY軸と一致した状態を、そこから水平面における時計回りが負の変化を意味している。また、図4-cは体幹捻転角度、図4-dは体幹前後傾角度の時系列データをそれぞれ示している。

まず、肩・腰水平回転角度に関して、リリース時における肩・腰水平回転角度はいずれの競技者においても概ね一致していた。表2に示したSSPとDSPにおける変化量に関して、SSPにおける肩水平回転角度はW1が著しく低値であった。一方、DSPにおいて、女子競技者では変化量が大きい程記録も高く、Mはいずれの女子競技者よりも変化量が大きかった。次に腰水平回転角度に関して、SSPにおける変化量は、W1とMは近い値であったが、W2とW3は高値であった。DSPにおける変化量は、女子競技者において記録が高いほど低値だった。

体幹捻転角度は、L-onにおいてW1が -72.92 deg, Mが -74.02 degであったのに対して、W2は -39.46 deg, W3は -45.94 degであった。さらに、リリース時の値はW1が 34.88 deg, W2が 31.44 deg, W3が 30.30 degであり、Mは 17.18 degであった。ここで、表2に示したDSPにおける変化量をみると、W1とMは高値であり、W2とW3は低値であった。上述した肩・腰水平回転角度の結果を踏まえると、肩・腰水平回転角度単独の値よりも、むしろその差分である体幹捻転角度が記録の差に影響したと考えられる。特に、女子競技者の中で最も記録が高かったW1とMは、DSPにおける体幹捻転角度の変化量が大きい。体幹捻転角度の変化量が大きいことは、DSPにおいて、体幹が捻られた姿勢からリリースに至るまでに大きく捻り戻されたことを意味する。男子競技者において、DSPにおける体幹の大きな捻り戻しは、前述した砲丸の累積移動距離に影響する要素であることから（Kato et al., 2024）、W1とMはこの捻り戻し動作を大きくすることで砲丸の累積移動距離の増大に繋げ、最終的な初速度と記録を高めたと考えられる。一方、DSPにおける体幹捻転角度の変化量がW2とW3において低値であったことは、SSPにおける肩水平回転角度の変化量に起因していると考えられる。W1はSSPにおける変化量は低値であったのに対して、W2、W3は高値であり、W1はSSPにおいて肩水平回転角度が増大しないような動作を、W2とW3は肩水平回転角度が増大する動作をしていたといえる。つまり、W2とW3は、SSPにおいて、いわゆる「過回転」の状態となってしまう、DSPにおいて十分に肩水平回転角度を変化させられず、結果的に体幹の捻り戻し動作が小さくなってしまったのではないかと考えられる。しかし、W1のSSPにおける肩水平回転角度の変化量はMと比べても低値であることから、競技レベルが異なる女子競技者を対象とした場合や対象者を増やした場合に同様の結果になるかは定かではなく、継続した

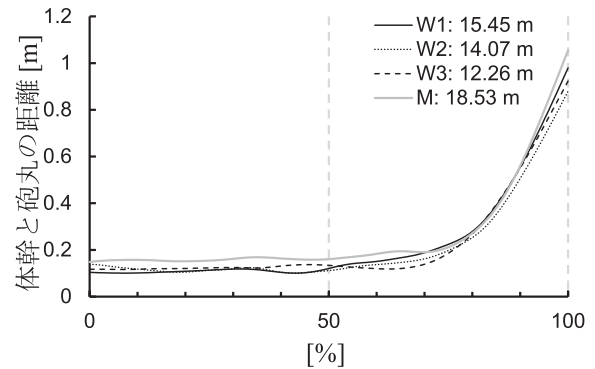


図5 体幹と砲丸の距離の時系列データ

データ収集と分析が必要だろう。

体幹前後傾角度は、SSPにおいてはいずれの対象者においても異なる波形を示したが、L-onにおいては、W1が -24.35 deg, W2が -20.95 deg, W3が -23.82 deg, Mが -25.67 degと類似した値であり、いずれの対象者も投てき方向に対して反対側に少し傾いた姿勢であった。リリースにおいては、W1が 0.53 deg, W2が 1.08 deg, W3が -4.86 deg, Mが 3.95 degであり、表2に示したDSPにおける変化量をみると、女子競技者においては記録が高い競技者ほどDSPにおける体幹前後傾角度の変化量が大きく、男子競技者はさらに変化量が大きかった。DSPにおける体幹前後傾角度は、身体を投てき方向へ起こしていく動作と関連している。詳細なメカニズムまでは言及できないものの、W1とMは前述した体幹の捻り戻しに加えて、投てき方向へ身体を十分に起こすことで、砲丸の累積移動距離を増大していた可能性がある。

体幹と砲丸の距離に関して

図5は、体幹と砲丸の距離の時系列データを示している。L-onにおける値は、W1が 0.12 m, W2が 0.11 m, W3が 0.13 m, Mが 0.16 mであり、対象者間での差は最大でも5cm程度であった。一方で、リリースにおいてはW1が 0.98 m, W2が 0.88 m, W3が 0.92 m, Mが 1.05 mであり、女子競技者においてはW1が最も値が大きく、いずれの女子競技者よりも男子競技者が高値であった。競技水準と年代が異なる男子競技者比較において、記録および動作の差異に繋がった要因の一つに、体幹と砲丸の距離がある（加藤ほか, 2021）。これは、体幹と砲丸の距離の増大が、砲丸の速度に対する体幹の長軸回転の貢献に影響するためである（田内ほか, 2006）。各対象者の形態に関する情報は取得できていないが、Mは男子競技者であるため、女子競技者よりも身長や上肢長が長く、体幹と砲丸の距離も増大していた可能性が考え

られる。しかし、その点を踏まえたとしても、特に W1 は、W2, W3 と比較して体幹と砲丸の距離を増大させることで、体幹の長軸回転の貢献を高め、高い初速度を獲得していたのではないかと考えられる。

まとめ

本稿では、国内女子競技者における回転投法に焦点をあて、男子トップレベルの競技者との比較を交えることで、事例的にその動作の特徴を明らかにした。本稿の結果、特に国内でトップレベルの女子競技者は、砲丸の累積移動距離や体幹捻転角度、体幹前後傾角度、体幹と砲丸の距離からも、他の女子競技者よりも国内トップレベルの男子に類似した投動作を行っていたと考えられる。女子競技者の中で特に一貫した差異が観察されたのは体幹捻転角度であり、DSP におけるその変化量を大きくできるかどうか、砲丸の累積移動距離や砲丸の加速に差をもたらしている可能性が示唆された。一方で、男子競技者に関するこれまでの研究と比較して、肩・腰水平回転角度の結果などは一貫したものではなかったため、今後の継続したデータの収集と分析が不可欠であろう。

引用文献

- (1) Hay, J. (1993). The biomechanics of sports techniques, 4th ed. Prentice-Hall.
- (2) 加藤忠彦, 瀧川寛子, 山本大輔, 岩波健輔, 牧野瑞輝, 塚田卓巳, 村上雅俊 (2021) 世代別に見た国内男子砲丸投競技者における回転投法の特徴. 陸上競技研究紀要, 17 : 195-198.
- (3) Kato, T., Maeda, K., Mizushima, J., & Maeda, A. (2024) Investigation of a Theoretical Model for the Rotational Shot Put Technique. Journal of Applied Biomechanics, 40(6), 528-536.
- (4) 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. 陸上競技研究紀要, 2 : 65-73.