

国内女子砲丸投選手における世代別の投てき動作の特徴 —日本選手権と U20・U18 日本選手権の比較—

加藤忠彦¹⁾ 瀧川寛子²⁾ 野中愛里³⁾ 前田奎⁴⁾ 山本大輔⁵⁾ 塚田卓巳⁶⁾ 村上雅俊⁷⁾
1) 九州産業大学 2) 中京大学大学院 3) 筑波大学大学院 4) 筑波大学スポーツ R & D コア
5) 天理大学 6) 愛知淑徳大学 7) 大阪産業大学

1. はじめに

女子砲丸投は、中学生では 2.721 kg の重量を用いるが、高校生以降は 4 kg の重量を用いる。2020 年 1 月現在、女子における U18 日本記録は 15.17 m, U20 日本記録は 16.24 m, 日本学生記録は 17.39 m, そして日本記録は 18.22 m となっており、世代が上がるごとに記録は高くなっている。このような背景から、特に女子砲丸投においては、高校生から大学生、さらには社会人へと、体力および技術的な要因の向上や変化によって、その競技水準が高まっていることが推察される。また近年では、2016 年に U20 日本記録が、2019 年に U18 日本記録がそれぞれ樹立されており、他の世代も含めて今後さらなる記録の更新が期待される。以上のことから、各世代におけるトップ選手の投てき動作の特徴を明らかにすること、また、より競技水準が高い世代との差異を明らかにすることは、女子砲丸投の指導やトレーニングの一助になると考えられる。

本研究では、国内女子砲丸投における世代別の上位選手を対象に、他の世代との比較から投てき動作の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2. 1. 分析試技

2019 年 6 月 30 日に行われた第 103 回日本陸上競技選手権大会（以下、NCH 群）と 2019 年 10 月 20

日に開催された第 35 回 U20 日本陸上競技選手権大会（以下、U20 群）、および第 13 回 U18 日本陸上競技選手権大会（以下、U18 群）における各上位 3 名の最も記録が良かった 1 試技を分析の対象とした。なお、対象となった全ての選手は右手投げで、グライド投法を用いていた。対象者および対象試技の記録は表 1 に示した通りであった。

2. 2. 撮影方法

投てき動作は、サークルの側方及び後方に設置した 2 台のデジタルビデオカメラ（HDR-PJ670, Sony）を用いて、毎秒 60 コマ、シャッター速度 1/1000s で撮影した。本研究では、投てき方向を Y 軸、Y 軸に対して右方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸とする右手系の静止座標系を設定した。また、サークルの中心を原点に、前後方向 2.00 m, 左右方向 1.82 m の 9 か所に、マーク間隔 0.40 m のキャリブレーションポールを垂直に立て、あらかじめ撮影した。

2. 3. 分析方法

ビデオカメラによって撮影された映像から、各コマにおける身体 4 点（左右肩関節、左右股関節）と砲丸中心の 5 点をデジタル化し画面上の座標値を算出した。そして、三次元 DLT 法により実長換算することで、分析点と砲丸の三次元座標値を求めた。算出した 3 次元座標値は、残差分析法（Winter, 1990）によって決定された最適遮断周波数（3.6-5.4Hz）で、4 次の Butter-worth filter により平滑

表 1 分析対象の選手と記録

順位	NCH		U20		U18	
	氏名	記録(m)	氏名	記録(m)	氏名	記録(m)
1位	郡 菜々佳	16.06	大野 史佳	14.79	廣島 愛亜梨	14.63
2位	高橋 由華	15.47	秋山 愛莉	14.62	日夏 涼香	13.87
3位	長沼 瞳	15.18	久保田 亜由	14.36	山本 佳奈	13.47

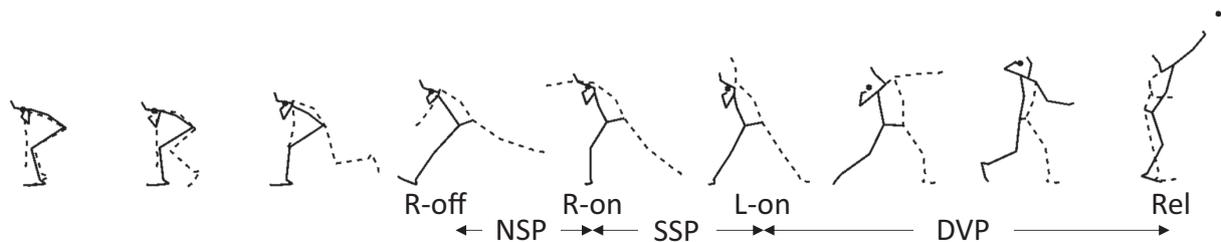


図1 砲丸投における投てき動作のスティックピクチャ

化した。なお、2つの映像の同期は、砲丸のリリース時点のコマ数で行った。

2. 4. 分析項目

本研究では、グライド動作後半の右足離地(R-off)からリリース(Re1)までを分析区間とした。また、上記に加え右足接地(R-on)と左足接地(L-on)をイベントとして設定し、R-offからR-onを非支持局面(NSP)、R-onからL-onを片脚支持局面(SSP)、L-onからRe1を投げ局面(DVP)とした(図1)。

投てき動作に関するパラメータとして以下を算出した。

- 1) リリースパラメータ：リリース速度，リリース角度，リリース高
- 2) 肩水平方位角：左肩関節から右肩関節に向かうベクトルが水平面にてY軸となす角度
- 3) 腰水平方位角：左股関節から右股関節に向かうベクトルが水平面にてY軸となす角度
- 4) 体幹捻転角度：肩水平方位角と腰水平方位角との差分(肩が腰を追い越した状態を正，腰が肩を追い越した状態を負)
- 5) 体幹前後傾角度：左右股関節の midpoint から左右肩関節の midpoint へ向かうベクトルが矢状面にてZ軸となす角度(投てき方向と反対に傾いた状態を負，投てき方向に傾いた状態を正)

以上のパラメータは、各競技会における上位3選手の平均値±標準偏差で示した。また、各変数の経

時的な変化を観察ならびに比較するために Spline 関数を用いて、時間軸を R-off を 0 %，R-on を 25 %，L-on を 50 %，Re1 を 100 % とした 101 個のデータに規格化した。

3. 結果および考察

3. 1. リリースパラメータについて

まず、表2について、投てき記録の平均値はNCH群が15.57 m，U20群が14.59 m，U18群が13.99 mと、世代が上がるにつれて高値であった。同様にリリース速度も合成成分ではNCH群 > U20群 > U18群となっていた。一方で、前方成分ではNCH群 > U18群 > U20群，上方成分ではU20群 > NCH群 > U18群であり，合成成分とは異なっていた。また，左右成分ではNCH群 > U20群 > U18群であり，U18群のみ負の値であったが，絶対値ではU20群とU18群同程度であった。加えて，前方成分と左右成分の合成である水平速度においても，NCH群が顕著に高いことが分かる。リリース高とリリース角度に注目すると，リリース高はNCH群 > U20群 > U18群となっており，リリース角度はU20群が最も高値であり，NCH群とU18群は同程度の値であった。Linthrone (2001) によると砲丸投における力学的に最適なリリース角度は，28 - 34° の範囲である。よって，NCH群とU18群は適切なリリース角度で砲丸をリリースしていたが，U20群はリリース角度が

表2 投てき記録とリリースパラメータ

	NCH	U20	U18
投てき記録 (m)	15.57 ± 0.45	14.59 ± 0.22	13.99 ± 0.59
リリース速度			
左右 (m/s)	1.23 ± 1.25	0.20 ± 0.10	-0.24 ± 0.98
前方 (m/s)	9.78 ± 0.25	8.82 ± 0.28	9.05 ± 0.58
上方 (m/s)	6.59 ± 0.25	6.66 ± 0.28	6.03 ± 0.19
合成 (m/s)	11.90 ± 0.12	11.05 ± 0.05	10.91 ± 0.37
リリース高 (m)	2.03 ± 0.05	1.98 ± 0.16	1.94 ± 0.09
リリース角度 (°)	33.68 ± 1.48	36.62 ± 2.03	33.35 ± 2.35

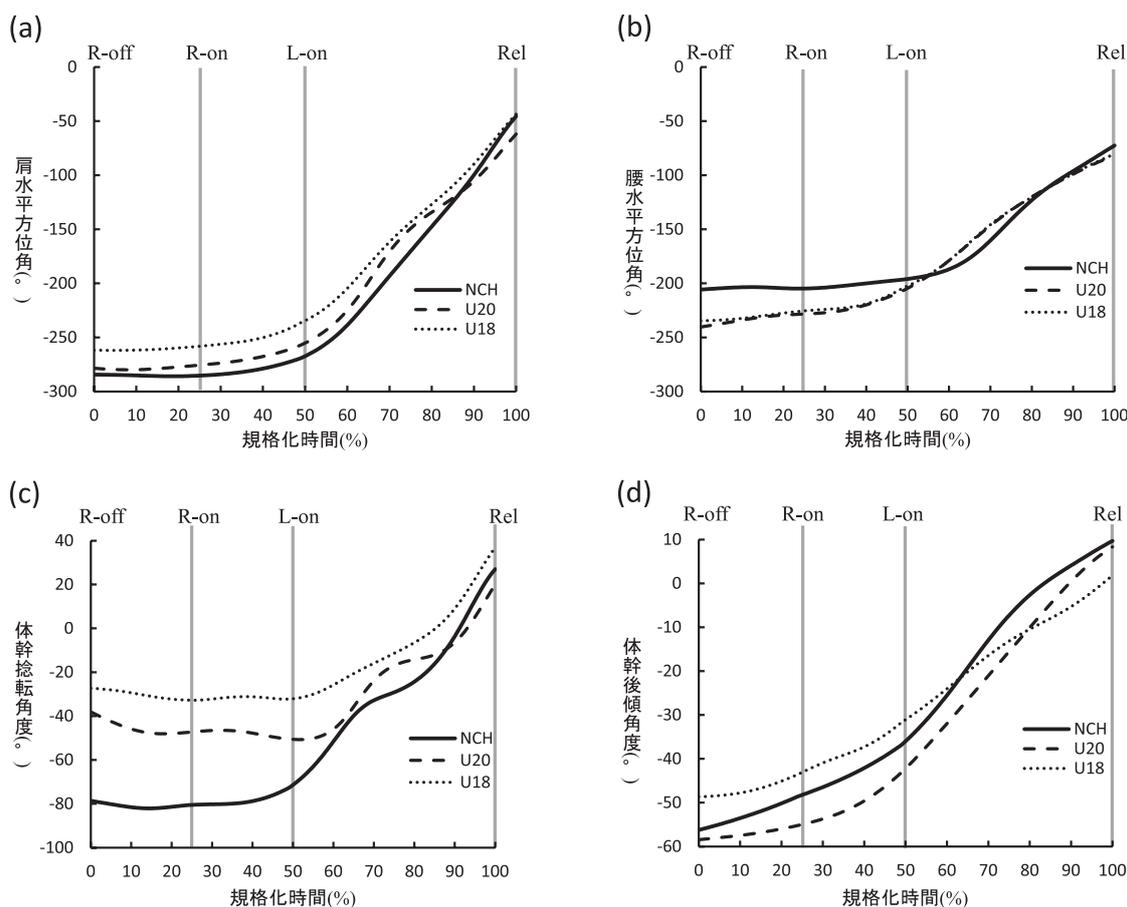


図2 肩水平方位角, 腰水平方位角, 体幹捻転角度および体幹前後傾角度

大きくなりすぎていた可能性がある。以上のことから、U18群を基準に考えた場合、U20群は、U18群に比較してより上方への砲丸の加速が強調されているが、その結果として投射角度が大きくなりすぎ、水平方向への加速が多少損なわれた投てき動作であったと考えられる。一方でNCH群は、水平方向への砲丸の加速を損なわずに、上方への加速も行うことで、より効率的に砲丸を加速できる投てき動作を行っていたといえる。

3. 2. 肩水平方位角, 腰水平方位角, 体幹捻転角度および体幹前後傾角度について

図2aは、肩水平方位角の変位を規格化時間で示している。なお、水平方位角は、投てき方向(Y軸)を 0° とし、 -90° を投てき方向に対して右側(X軸)、 -180° を投てき方向と反対側、そして -270° を投てき方向に対して左側として算出している。肩水平方位角は、NCH群、U20群、U18群全てにおいて類似した変化をしていたが、U18群はU20群より、またU20群はNCH群よりも、R-offからL-onにかけて、既に正の方向に回転した状態であった。つまり、U18群はU20群に比較して、U20群はNCH群に比較して、グライドの後半であるNSPおよびSSPか

らDVPへと移行していく段階で、既に両肩を結ぶラインが投てき方向に開いてしまっていたといえる。次に、図2bに示した腰水平方位角は、U20群とU18群において同様の変化をし、各時点での値も同等であった。しかし、R-offの時点でNCH群がU20群とU18群に比較して顕著に正の方向に回転していた。つまり、NCH群は、グライドの後半であるNSPおよびSSPからDVPへと移行していく段階で、より右腰を投てき方向に向けて入れるような動作が強調されていたと推察される。

図2cは、体幹捻転角度の変化を規格化時間で示している。R-offからL-onにかけては、U18群 > U20群 > NCH群となっており、U18群よりU20群が、U20群よりNCH群が体幹を大きく捻った状態でグライドの後半であるNSPおよびSSPからDVPへと移行していたことを示している。これは、前述の肩水平方位角と腰水平方位角の世代間での差異が要因となっていると考えられる。つまり、U18群に比較した場合、U20群は、両肩を結ぶ線分が投てき方向に向かって開くことを抑えることで、それに加えて、NCH群は、両腰を結ぶ線分を投てき方向へと入れる動作を強調することで、より大きな体幹捻転角度を作り出していたと考えられる。次に、

DVPにおける体幹捻転角度の変化量(L-onとReIの差分)に注目すると、NCH群は98.39°、U20群は70.62°、U18群は69.00°であり、NCH群が顕著に高値でありU20群とU18群は同等の値であった。つまり、NCH群は、DVPにおいて体幹がより大きく捻り戻されていた。田内・遠藤(2009)によると、体幹の捻転動作は、大きなエネルギー発揮のための前提となる役割を果たしている。また、砲丸の水平速度の獲得に寄与する身体各部位の貢献度(田内ほか、2006)に関して、体幹の長軸周りの角速度の増大が、同一の選手における水平速度の増大に貢献した可能性が報告されている(加藤ほか、2015)。本研究では体幹の長軸周りの角速度を算出していないため、詳細なメカニズムは分からないが、NCH群は、より大きく捻った体幹をDVPで十分に捻り戻すことにより、大きなエネルギーを獲得するとともに砲丸へ伝達できていたこと、その結果として、高い水平速度を獲得していた可能性が考えられる。一方で、U20群はU18群より大きな体幹の捻りを作ることができていたものの、DVPにおける捻り戻し角度に大きな差がないことから、体幹の捻りによって獲得したエネルギーを、DVPにおいて砲丸へと伝達することが不十分であったと考えられる。

図2dは、体幹の前後傾角度の規格化時間における変化を示している。R-offからL-onにかけては、U18群 > NCH群 > U20群であり、U20群が最も体幹が投てき方向と反対側に前傾した状態のままグライドの後半であるNSPおよびSSPからDVPへと移行しており、U18が最も体幹が投てき方向へと起き上がった状態でDVPへと移行していたことを示している。次に、DVPにおける変化量は、NCH群は45.66°、U20群は50.52°、U18群は32.92°であった。これらについて、先述したリリースパラメータとの関連を考慮すると、まずU18群は、NCH群とU20群に比較してDVPにおける身体を起こす動作が不十分であり、砲丸の上方への加速が不十分であったと考えられる。対照的に、NCH群とU20群は、DVPにおいて身体を大きく投てき方向へ起こす動作によって、砲丸の上方への加速へと繋げていることが示唆される。しかし、先に述べた通り、U20群はリリース角度が大きくなりすぎていたことが伺える。Hubbard(2001)は、力学的な観点から砲丸に対して鉛直方向に力を作用させることは、水平方向に比べて大きな筋力が必要になり非効率的であるとしている。その結果として、Linthrone(2001)は、過度のリリース角度の増大がリリース速度の減速を招くと指摘している。したがって、U20群は身体を起こす動作を

強調した結果として砲丸の上方への加速に繋げていたものの、水平方向への効率的な加速を出来ていなかった可能性がある。

4. まとめ

本研究では、国内女子砲丸投における世代別の上位選手を対象に他の世代との比較から投てき動作の特徴を明らかにした。その結果、U18群を基準に考えると、まずU20群では、DVPにおいて身体を投てき方向へより大きく起こす動作によって、砲丸を上方へと加速させることにより、リリース時の砲丸の合成速度を高めていることが示唆された。そしてNCH群は、身体を投てき方向へ大きく起こす動作に加えて、大きく捻った体幹をDVPにおいて十分に捻り戻すことによって、獲得したエネルギーを砲丸へと伝達し、上方と水平方向のどちらにも効率的に砲丸を加速させることで、より大きなリリース速度を獲得していることが示唆された。

参考文献

- 1) Hubbard, M., Mestro, N. J. and Scott, J. (2001) Dependence of release variables in the shot put. *Journal of Biomechanics*, 34(4): 449-456.
- 2) 加藤忠彦, 塚田卓巳, 田内健二 (2015) 畑瀬聡選手における日本新記録の投てき動作の特徴—18.78mと17.91mの比較—。陸上競技研究紀要, 11: 96-99.
- 3) Linthrone, N. P. (2001) Optimum release angle in the shot put. *Journal of Sports Sciences*, 19 (5): 359-372.
- 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—世界レベル選手と日本レベル選手との比較—。陸上競技研究紀要, 2: 65-73.
- 5) 田内健二, 遠藤俊典 (2009) 陸上競技の投てき種目における体幹の捻転動作の役割。バイオメカニクス研究, 13 (3): 170 - 178.
- 6) Winter, D. A. (1990) Kinematics. In: Winter, D. A. (eds.) *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons, pp. 11 - 50.