記録水準の異なるハンマー投競技者の ハンマーヘッドスピードとハンドルの動き

藤井 宏明¹⁾ 大山 圭悟²⁾ 藤井 範久²⁾

FUJII Hiroaki¹, OHYAMA-BYUN Keigo² and FUJII Norihisa²: Biomechanical study of hammer head speed and handle motion at different record levels in the hammer throw. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

Abstract: The purpose of this study was to investigate differences in the leading distance of the handle and handle movement of the hammer throw between competitors at different record levels during the turn phases, and the body movement required to obtain the handle leading distance. Forty-four male throwers (throwing record: 80.50-44.17m) participated in the study. Their throwing motions were videotaped using high-speed VTR cameras, and three-dimensional coordinates were calculated using a DLT method. Kinematic parameters calculated included the hammer head speed, the leading distance of handle, the handle velocity and velocity at the midpoint of the 2 shoulder joints using a rotating plane coordinate system where X_{icr} is the hammer head speed direction and Y_{icr} is the direction connecting the hammer head and the instantaneous rotation center. We also investigated differences in the calculation parameters between an “Excellent” group ($n=18$, 74.77 ± 4.30 m) and a “Normal” group ($n=26$, 55.80 ± 5.96 m). The basic findings were as follows: (1) There was no significant difference between competitors at different record levels in the magnitude of the handle leading distance. The “Excellent” group showed a higher handle velocity in the X_{icr} direction than the “Normal” group during the turn phase. (2) Handle velocity in the Y_{icr} direction was obtained mainly by increasing the midpoint of the shoulder joint velocity due to the trunk back lean during the double support phase (DSP). Since the increase and decrease in the handle leading distance are consistent with the increase and decrease of handle velocity in the Y_{icr} direction, back lean of the trunk may increase the handle leading distance. In addition, generation of the handle velocity in the X_{icr} direction was achieved mainly by rotational movement of the body.

Key words : turn phase, leading distance of handle, handle velocity

キーワード : ターン局面, ハンドル先行距離, ハンドル速度

I 緒 言

ハンマー投において、投擲記録はハンマー投射時の初速度が最大の決定要素（坂東ほか，2006；池上ほか，1994；室伏ほか，1982；岡本ほか，2000）であるため、スイング、ターン動作を行うことでハンマーヘッドスピードを徐々に増加させ、リリース時の初速度を最大限に高める必要がある。ターン動作中におけるハンマーヘッドス

ピード増加に関する先行研究に着目すると、ハンドルがハンマーヘッドとハンマーの瞬間回転中心を結ぶ線分より先行した状態でワイヤーに張力を加えることによって、ハンマーヘッドを加速する効果が生じると報告している（藤井ほか，2008b）。また、ハンドル先行距離正積分値とヘッド加速度との間に有意な相関関係が認められたことから、ハンマーヘッド加速度を大きくするためには、ハンドルを先行させるだけでなく、ハンドルをハンマーヘッドと瞬間回転中心を結ぶ線分よ

1) 帝京大学医療技術学部柔道整復学科
〒320-8551 栃木県宇都宮市豊郷台 1-1
2) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先 藤井宏明

1. Department of Judo Therapy, Teikyo University Faculty of Medical Technology
1-1 Toyosatodai, Utsunomiya, Tochigi 320-8551
2. Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author fujii@ucjt.teikyo-u.ac.jp

り距離的にも時間的にも長く先行させることが重要であると述べている(藤井ほか, 2010)。さらに, ハンドル先行距離の獲得に関して, 藤井ほか(2019)は, ターン局面におけるハンドル先行距離の増減と回転平面上における法線方向(瞬間回転中心方向)のハンドル速度の増減パターンが一致していたことを明らかにした。そして, ある瞬間に競技者が瞬間回転中心方向へハンドルを牽引することで, 結果的に次の時点におけるハンドル先行距離が増加することを明らかにしている。つまり, ハンマーヘッドスピードを増加するためには, ある瞬間からハンドルを瞬間回転中心方向へ牽引し, ハンマーヘッドと瞬間回転中心を結ぶ線分より距離的にも時間的にもハンドルを先行させる(ハンドル先行距離を獲得する)必要性がある。加えて, 競技力向上のための知見を得るためには, 競技力の高い競技者のハンドルの動きを検討し, リリース時の初速度を高めるためのターン動作中のハンマーヘッドスピード増加方略(ハンドル先行距離獲得方略)を検討することが有効になると考えられる。しかしながら, 記録水準が高い競技者あるいは低い競技者を含めた検討はなされていない。

また, より効率的にパフォーマンスを向上させるためには, ハンドル先行距離獲得のための身体動作についても検討が必要となろう。藤井ほか(2010)は, ハンドル先行距離を増大させるためには, 左腕の水平外転と体幹の捻り戻し動作を同時に行うこと, および両肩関節中点をハンマーヘッドからハンドルへ向かう方向よりも左肩から右肩に向かう方向よりも移動させるような力を体幹や下肢で発揮することによって, ハンドルを大きく先行させることができると報告している。しかしながら, この報告においてはハンドル先行距離の増減と左腕の水平外転と体幹の捻り戻し動作などの変化パターンが完全に一致しているとはいえず, ハンドルの先行距離の増減に関わる動作に関して推察するまでにとどまっている。これらのことから, 競技力向上のためにはハンドルの動きと身体動作との関係性について定量的に検討を行い, ハンドル先行距離を獲得するための身体の動

きについて検討する必要性があると考えられる。

そこで, 本研究の目的は, 異なる記録水準の競技者間におけるハンマーヘッドスピード増加に影響するハンドル先行距離とハンドルの動きの違いについて検討すること, およびハンドル先行距離を獲得するための身体の動きについて定量的に検討することとした。

II 方法

1. 対象者およびデータ収集

対象者は, ハンマー投を専門とする男子競技者44名(投擲記録: 80.50—44.17m 4回転投法)であった。分析対象者には, 世界選手権大会優勝者やオリンピック優勝者などの世界一流競技者, 日本選手権大会上位入賞者や日本学生選手権大会優勝者などの日本一流競技者や日本学生一流競技者が含まれていた。投擲動作は, 2007年度から2015年度の競技会, 競技会と同様の条件下での実験試技において, 全力で正規重量のハンマーを用いた投擲を3—6投行った試技である。なお, 競技会においては, 競技会主催者から許可を得た上で撮影を行った。本研究で用いたVTR画像の一部は(財)日本陸上競技連盟科学委員会によって撮影されたものも含まれている。また, 実験試技に関しては対象者に研究目的, 実験内容や起こりうる危険性などを書面および口頭で十分に説明し, 安全面に十分配慮し遂行することを条件に実験参加への同意を得た。投擲試技の撮影には, ハイスピードカメラ(HSV-500C³, 撮影スピード毎秒250コマ, 露出時間1/2000秒, NAC社製, Exlim EX-F1, 撮影スピード毎秒300コマ, 露出時間1/2000, CASIO社製)を2—3台用いた。なお, 対象者における最も記録の良い試技を分析試技とした。

VTR画像をFrame Dias IV(DKH社製)を用いて1コマおきに手動デジタイズし, 身体分析点23点およびハンマーヘッド1点の2次元座標値を得た。キャリブレーションボールの座標値からカメラごとにDLT定数を算出し, DLT法(Abdel-Aziz and Karara, 1971)を用いて分析点の3次元

座標値を算出した。サークルの中心に右手座標系を設定し、X 方向を投擲方向に対し直交する方向、Y 方向を投擲方向、Z 方向を鉛直方向とした。また、撮影を複数回分けて行っており、身体分析点の 3 次元座標値算出における標準誤差の最小値と最大値は X 軸：0.005m—0.009m、Y 軸：0.007m—0.009m、Z：0.007m—0.011m であった。そして、分析点の座標成分ごとの最適遮断周波数（4.6—7.8Hz）を決定し（Winter, 2004）、Butterworth low-pass digital filter を用いて平滑化を行った。なお、左利き競技者（上方からみて時計回りへ回転する対象者）については、対象者の各分析点の X 座標値に -1 を乗じることで、上方からみて反時計回りに回転する対象者として扱った。

2. 算出項目

2.1 分析区間および動作区分点

本研究では、スイング終了地点（右足離地）からハンマーが手から離れた時点（リリース時点）までをターン動作局面と定義し、分析対象区間とした（Fig.1）。右足が離地した時点を Roff、右足が接地した時点を Ron とした。片脚支持局面（Single Support Phase, 以下「SSP」と略す）は右足が離地してから接地するまでの局面、両脚支持局面（Double Support Phase, 以下「DSP」と略す）は右足が接地してから離地するまでの局面とし、SSP と DSP を合わせた局面を 1 回転とした。なお、ハンマーヘッドの鉛直座標値が極大となる 4 回の時点（High point）を HP1, HP2, HP3, HP4 とし、ハイポイント後にハンマーヘッドの鉛直座標値が極小となる 4 回の時点（Low point）を LP1, LP2, LP3, LP4 と定義した。

2.2 ハンマーヘッドスピードおよびハンマーヘッド移動距離の算出

ハンマーヘッドの 3 次元座標値を座標成分ごとに時間微分することで、ハンマーヘッド速度を算出した。また、ハンマーヘッド速度の合成値を算出することでハンマーヘッドスピードを算出した。さらに、各ターンのハンマーヘッドスピード最大値から最小値を減算することで、各ターンのハンマーヘッドスピード増加量を算出した。

ハンマーヘッド移動距離は、あるフレームから次のフレームまでのハンマーヘッドの絶対距離を算出し、ターン開始からターン終了時までの和をとることで算出した。また、同様の方法で各ターンにおける HP—LP, LP—Roff のハンマーヘッド移動距離を算出した。

HP—LP のハンドル移動距離は、あるフレームから次のフレームまでのハンドルの絶対距離を算出し、各ターンの HP から LP までの和をとることで算出した。

2.3 回転平面座標系、ハンドル先行距離およびハンドル速度の算出

ハンマー瞬間回転中心（以下「瞬間回転中心」と略す）およびハンドル先行距離の算出には、藤井ほか（2008b）の算出方法を用いた。左手第 3 指の中手指節関節の座標値をハンドルとワイヤーの接続部（以下「ハンドル」と略す）の座標値と仮定し、撮影した各フレームの対象とする時点およびその前後の時点のハンドルおよびハンマーヘッドとの距離の 2 乗和が最小となる平面（以下「ハンマー回転平面」と略す）を算出した。次に、撮影した各フレームの対象とする時点で、ハンマー一回転平面内における瞬間回転中心座標値（ハン

Fig.1 Definition of turn phases

マー回転平面内の2成分)と瞬間回転中心回りのハンマーヘッドの回転角速度(1成分)を未知数とし、瞬間回転中心からハンマーヘッドおよびハンドルへ向かうベクトルと瞬間回転中心回りの角速度ベクトルとの外積により計算上のハンマーヘッドおよびハンドル速度ベクトルの算出式を導出し、さらに実測したハンマーヘッドおよびハンドル速度ベクトルとの差分ベクトルの大きさの2乗和が最小となる点を瞬間回転中心座標値として算出した。なお、瞬間回転中心を算出する際には、手動デジタイズによる誤差を低減するため、坂東ほか(2006)と同様に、ハンドル速度ベクトルおよびハンマーヘッド速度ベクトルに対して再度平滑化したデータを用いた(遮断周波数6.25—7.50Hz)。そして、ハンマーヘッドを原点として、ハンマーヘッド速度ベクトルの方向を X_{icr} (接線方向)、ハンマーヘッドから瞬間回転中心に向かう方向を Y_{icr} (法線方向)、 X_{icr} と Y_{icr} に直交する方向を Z_{icr} とする移動座標系(回転平面座標系, Fig.2)を設定し、ハンドルの X_{icr} 座標値をハンドル先行距離とした(藤井ほか, 2008b)。

また、回転平面座標系へハンマーヘッド速度ベクトルおよびハンドル速度ベクトルを投影し、回転平面座標系におけるハンマーヘッド速度とハンドル速度(接線方向成分:ハンドル接線速度, 法線方向成分:ハンドル法線速度)を算出した(藤

井ほか, 2019)。さらに、回転平面座標系 $X_{icr}Y_{icr}$ 平面上におけるハンマーヘッド速度ベクトルとハンドル速度ベクトルとのなす角度を算出した。

次に、藤井ほか(2019)の方法を用いて、静止座標系におけるハンマーヘッド速度を式(1)に示すように、ハンドル速度とハンマー回転速度成分(hammer rotation velocity)に分けた。

$$V_{hammer} = V_{hammer/handle} + V_{handle} \quad (1)$$

その後、式(1)の右边第1項を回転平面座標系に投影することで、回転平面座標系におけるハンマー回転速度成分を算出した。また、ハンドルの動きと身体動作との関係性について定量的に検討するために、両肩関節中点速度とハンドルと両肩関節中点速度の相対速度を算出することで、ハンドル速度を以下のように表現した。

$$V_{handle} = V_{Msh} + V_{handle/Msh} \quad (2)$$

式(2)の右边第1項を回転平面座標系に投影することで、回転平面座標系における両肩関節中点速度(V_{Msh})、第2項を回転平面座標系に投影することで、回転平面座標系における両肩関節中点に対するハンドル速度($V_{handle/Msh}$)を算出した。

2.4 体幹の動きによる両肩関節中点速度の算出

2.4.1 体幹座標系の設定

Fig.3に体幹座標系の定義を示した。左右の股関節中心を結んだ線分の中点を原点とし、原点か

Fig.2 Rotating plane coordinate system, instantaneous center of rotation, and leading distance of handle

Fig.3 Definition of reference frame on trunk

ら左右の肩関節中心を結んだ線分の midpoint にむかうベクトルを Z_i とした。左股関節中心から右股関節中心に向かうベクトル X'_i と Z_i の外積により Y_i を算出、 Y_i と Z_i の外積により X_i を算出し、 X_i 、 Y_i 、 Z_i からなる移動座標系を体幹座標系として定義した。

2.4.2 体幹角速度の算出

本研究では、体幹座標系の各軸方向の単位ベクトルを用いて体幹角速度を求めた。体幹座標系の各軸方向の単位ベクトルの時間微分は、以下のよう表すことができる (阿江・藤井, 2002)。

$$\frac{di_{tr}}{dt} = \omega_{tr} \times i_{tr}, \quad \frac{dj_{tr}}{dt} = \omega_{tr} \times j_{tr}, \quad \frac{dk_{tr}}{dt} = \omega_{tr} \times k_{tr}$$

ただし、 $\omega_{tr} = \omega_{trx}i_{tr} + \omega_{try}j_{tr} + \omega_{trz}k_{tr}$ である。したがって、体幹角速度ベクトルの成分は以下の式で求められる (阿江・藤井, 2002)。

$$\omega_{trx} = k_{tr} \cdot \frac{dj_{tr}}{dt}, \quad \omega_{try} = i_{tr} \cdot \frac{dk_{tr}}{dt}, \quad \omega_{trz} = j_{tr} \cdot \frac{di_{tr}}{dt}$$

なお、本研究においては ω_{trx} を体幹前後傾角速度 (正の値は後傾、負の値は前傾を示す)、 ω_{try} を体幹左右傾角速度 (正の値は右傾、負の値は左傾を示す)、 ω_{trz} を体幹長軸回りの角速度 (上方からみて右投げ競技者の回転方向である反時計回りを正の値) とした。求めた体幹角速度ベクトルは、体幹座標系における角速度ベクトルであるので、座標変換行列を用いて静止座標系における体幹角速度ベクトルに変換した。

2.4.3 体幹の動きによる法線方向の両肩関節中点速度の算出

本研究では、両肩関節中点速度を以下の式で表現した。

$$V_{csh} = V_{chip} + V_{csh/chip} \dots (1)$$

なお、 V_{chip} は、左右の股関節中心を結ぶ線分の midpoint を算出し、その座標値を微分したもの (両股関節中点速度) である。さらに、Springs et al. (1994) および宮西ほか (1996) を参考に、 V_{csh} を 2.4.2 で算出した静止座標系における体幹各軸回りの角速度 (ω_{trx} , ω_{try} , ω_{trz}) を用いて表すと、

$$V_{csh} = V_{chip} + \omega_{trx} \times r_{csh/chip} + \omega_{try} \times r_{csh/chip} + \omega_{trz} \times r_{csh/chip} \dots (2)$$

と表現できる。なお、 $r_{csh/chip}$ は、左右の股関節中心を結ぶ線分の midpoint から左右の肩関節中心を結ぶ線分の midpoint への相対位置ベクトルを示している。(2) の右辺第 2 項は体幹座標系 X_i 軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度 (体幹前後傾動作によって生じた両肩関節中点速度)、第 3 項は体幹座標系 Y_i 軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度 (体幹左右傾動作によって生じた両肩関節中点速度)、第 4 項は体幹座標系 Z_i 軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度 (体幹長軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度) とした。算出したこれらの値を回転平面座標系に投影することで、法線方向の両股関節中点速度、体幹前後傾動作によって生じた両肩関節中点速度、体幹左右傾動作によって生じた両肩関節中点速度、体幹長軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度を算出した。なお、計算上、回転平面座標系における体幹長軸回りの動作によって生じた両肩関節中点速度の値はゼロになるため、本研究では削除した。

3. 時間の規格化

時系列データについては、1 ターンにおける 4 局面 (Roff—HP, HP—Ron, Ron—LP, LP—Roff) それぞれの時間を 25% とし 1 ターンを 100% と定義した。また、4 回転の分析区間の時間を、3 次元スプライン関数を用いた内挿補間により時間の規格化 (400%) を行った。

4. 統計処理

本研究では、異なる記録水準の競技者間でのハンマーヘッドスピード増加方法の違いについて検討するために、2019 年度日本選手権大会の参加標準記録 (64m) 以上の対象者を Excellent 群 ($n=18$, 投擲記録平均値 74.77 ± 4.30 m), それ未満を Normal 群 ($n=26$, 投擲記録平均値 55.80 ± 5.96 m) とした。各算出項目における両群の平均値の差に関して、対応のない t 検定を用いて有意水準 5% の検定を行った。特に時系列データの

場合には、規格化時間の1%毎に検定を行った。

III 結 果

1. ハンマーヘッドスピード、ハンドル先行距離およびハンドル速度

Fig.4に、ターン動作中におけるExcellent群とNormal群のハンマーヘッドスピードについて示した。Excellent群はNormal群と比較して、ターン開始時点(Roff1)からRelまで有意に大きい値を示していた。

Fig.5に、ターン動作中におけるExcellent群とNormal群の接線方向のハンマー回転速度成分、ハンドル接線速度、ハンドル法線速度およびハンドル先行距離について示した。接線方向のハンマー回転速度成分とハンドル接線速度について、Excellent群はNormal群と比較して、Roff1—Relにおいて有意に大きい値を示していた(Fig.5a, Fig.5c)。ハンドル先行距離およびハンドル法線速度は、Roff2, Ron3, LP4—Rel付近に有意差が認められた(Fig.5b, Fig.5d)。

Fig.6に、回転平面座標系 X_{icr} — Y_{icr} 平面上におけるハンマーヘッド速度ベクトルに対するハンドル速度ベクトルのなす角度を示した。正の値はハンマーヘッド速度に対して、ハンドル速度が上向

き、負の値は下向きであることを示している。Excellent群はNormal群と比較して、LP1, LP2, LP3付近において有意に小さな値を示した。

2. ハンマーヘッド移動距離、ハンドル移動距離およびハンマーヘッドスピード増加量

Table 1にExcellent群とNormal群のハンマーヘッド移動距離について示した。Excellent群はNormal群と比較して、各ターンのHP—LP間のハンマーヘッド移動距離が大きかった。なお、各ターンのDSPのハンマーヘッド移動距離について、有意差は認められなかった。

Table 2にExcellent群とNormal群のハンドル移動距離について示した。Excellent群はNormal群と比較して、各ターンのHP—LP間のハンドル移動距離が大きかった。

Fig.7にExcellent群およびNormal群における各ターンのハンマーヘッドスピード増加量について示した。Turn1およびTurn4においてExcellent群が有意に大きな値を示した($p < 0.05$)。

3. 回転平面座標系における両肩関節中点速度および両肩関節中点に対するハンドル速度について

Fig.8に回転平面座標系における両肩関節中点

Fig.4 Hammer head speed (solid line: Excellent group, dot line: Normal group)

Fig.5 Tangential direction (X_{icr}) of hammer rotation velocity, Leading distance of handle, Tangential direction (X_{icr}) of handle velocity and Radial direction (Y_{icr}) of handle velocity on rotating plane coordinate system

Fig.6 Angle between hammer head velocity and handle velocity on the X_{icr} - Y_{icr} plane

Table 1 Hammer head moving distance

	Excellent	Normal	P-Value
Roff1 — Rel	43.94 ± 1.08	42.18 ± 1.20	<0.01
DSP1	6.22 ± 0.55	6.02 ± 0.45	0.19
DSP2	5.72 ± 0.44	5.53 ± 0.42	0.15
DSP3	5.24 ± 0.45	5.12 ± 0.51	0.43
DSP4	6.55 ± 0.88	6.17 ± 0.51	0.07
HP1 — LP1	5.62 ± 0.17	5.44 ± 0.23	<0.01
HP2 — LP2	5.30 ± 0.13	5.14 ± 0.20	<0.01
HP3 — LP3	5.21 ± 0.13	5.00 ± 0.14	<0.01
HP4 — LP4	5.13 ± 0.14	4.96 ± 0.20	<0.01
LP1 — Roff2	2.58 ± 0.47	2.93 ± 0.40	<0.05
LP2 — Roff3	2.22 ± 0.59	2.35 ± 0.39	0.40
LP3 — Roff4	1.91 ± 0.66	2.00 ± 0.37	0.57
LP4 — Rel	3.40 ± 0.42	3.28 ± 0.22	0.21

† Unit : [m] Mean±SD

†† a significance level is set at a risk rate of 5% or less.

Table 2 Handle moving distance during HP — LP

	Excellent	Normal	P-Value
HP1 — LP1	1.91±0.12	1.65±0.22	<0.01
HP2 — LP2	1.61±0.07	1.42±0.18	<0.01
HP3 — LP3	1.52±0.07	1.31±0.16	<0.01
HP4 — LP4	1.52±0.10	1.29±0.16	<0.01

† Unit : [m] Mean±SD

†† a significance level is set at a risk rate of 5% or less.

Fig.7 Increment of hammer head speed during each turn phase

速度および両肩関節中点に対するハンドル速度 ($V_{handle/Msh}$) を示した. 接線方向の両肩関節中点速度は, Roff1—Rel において負の方向 (ハンマーヘッド速度ベクトルと反対方向) を向いていた (Fig.8a). また, Excellent 群は Normal 群と比

較して, 各ターンにおける極小値出現付近において値が有意に小さかった. 一方, 法線方向の両肩関節中点速度は, 各ターンの DSP (Ron—Roff) で増加し, 正の値を示していた (Fig.8b). また, Excellent 群は Normal 群と比較して, HP4—Rel

Fig.8 Velocity of midpoint of both shoulder joints (V_{Msh}) and $V_{handle/Msh}$ on rotating plane coordinate system

(規格化時間 325—400%) において有意に大きな値を示していた。

次に、接線方向の両肩関節中点に対するハンドル速度は、ターン動作中に値が徐々に増加していた (Fig.8c)。また、Excellent 群は Normal 群と比較して、Roff1—Rel において大きな値を示した ($p < 0.05$)。一方、法線方向の両肩関節中点に対するハンドル速度は、各ターンの Roff—LP において値が正の値を示し、LP—Roff は負の値を示していた (Fig.8d)。また、Excellent 群は Normal 群と比較して、Ron1 付近、Roff2—HP2 で Excellent 群が大きい値、LP2—Roff3 で Excellent 群が小さな値を示した。

4. 体幹の動きによる法線方向の両肩関節中点速度

Fig.9 にターン動作中における体幹の動きによる法線方向の両肩関節中点速度および体幹座標系における体幹角速度を示した。両股関節中点速

度については、各ターンの SSP で負の値を示し、LP—Roff 付近で正の値を示していた (Fig.9a)。また、2 群間における統計的な有意差が認められた局面が少なかった。

法線方向の体幹前後傾動作によって生じた両肩関節中点速度は、全ての DSP と 2 回転目以降の SSP において正の値を示していた (Fig.9b)。また、体幹前後傾角速度に着目すると、全ての DSP と 2 回転目以降の SSP において正の値 (体幹後傾) を示していた (Fig.9d)。さらに、法線方向の体幹前後傾動作によって生じた両肩関節中点速度および体幹前後傾角速度について、Excellent 群は Normal 群と比較して、Roff3—Ron3 および HP4—Rel 付近において大きな値を示した ($p < 0.05$)。

法線方向の体幹左右傾動作によって生じた両肩関節中点速度について、Roff1—LP2 は正の値を示す局面が多くみられたが、LP2—Rel では負の値を多く示していた (Fig.9c)。また、体幹左右傾角速度に着目すると、Roff1—LP2 は、負

Fig.9 Velocity of midpoint of both shoulder joints obtained from trunk motion toward and trunk angular velocity (solid line: Excellent group, dot line: Normal group)

の値（体幹左傾）を示したが、LP2—Relにおいては正の値（体幹右傾）を示す局面が多くみられた（Fig.9e）。さらに、法線方向の体幹左右傾動作によって生じた両肩関節中点速度について、Excellent群はNormal群と比較して、Roff3—HP3およびRon3—HP4付近において小さな値を示した（ $p < 0.05$ ）。

IV 考 察

1. 異なる記録水準のハンマー投選手のハンドル 先行距離およびハンドル速度

本研究の目的の1つは、異なる記録水準の競技者間におけるハンマーヘッドスピード増加に影響するハンドル先行距離とハンドルの動きの違いについて検討することであった。ターン動作

中のハンマーヘッドスピードについて、Excellent群はNormal群と比較して常に大きい値を示した（Fig.4）。坂東ほか（2006）は、記録水準の異なるハンマー投選手を対象に、投擲記録とターンごとにおけるハンマーヘッドスピード最大値、最小値、増加量および減速度との関係性について検討し、記録水準の高い競技者は各ターンのハンマーヘッド最大値および最小値が大きかったことを報告している。本研究においても、先行研究と同様に、記録水準の高い競技者は低い競技者と比較して、ターン動作中にハンマーヘッドスピードが大きい状況でターン動作を行っていることが確認することができた。したがって、本研究で設定した2群間には、十分に記録水準の違いがあるものとして議論を進める。

藤井ほか（2010）は、ハンマーヘッド加速量を

大きくするためには、ハンドルを先行させるだけでなく、ハンドルをハンマーヘッドと瞬間回転中心を結ぶ線より距離的にも時間的にも長く先行させることが重要であると述べている。ここで、リリース時の初速度を高めるためのターン動作中のハンマーヘッドスピード増加方略（ハンドル先行距離獲得方略）は、記録水準の違いによって異なる可能性が考えられる。これらのことから、ハンドル先行距離とハンドル先行距離の増減に係る法線方向のハンドル速度（ハンドル法線速度）の Excellent 群と Normal 群の差について検討した。Excellent 群は Normal 群と比較して、ハンマーヘッド速度に影響をおよぼすハンドル先行距離は、LP1—HP2 および LP4—Rel において Excellent 群が大きい値を示したものの、統計的な有意差が認められた局面が少なかった (Fig.5b)。次にハンドル法線速度について、Excellent 群は Normal 群と比較して各ターンの速度増加時に大きい値を示す時点で有意差が認められたが、ハンドル先行距離同様に、統計的な有意差が認められた局面が少なかった (Fig.5d)。これらのことから、記録水準の高い競技者はそうでない競技者と比較して、ハンドル先行距離獲得に関しては記録水準の差は小さかったと考えられる。一方、Excellent 群は Normal 群と比較して、ハンドル接線速度が Roff1—Rel で大きい値を示していた (Fig.5c)。なお、ハンマーヘッド速度はハンドル接線速度と接線方向のハンマー回転成分速度の和によって表すことができる。これらのことから、記録水準の高い競技者は、そうでない競技者と比較して、ターン開始時点からハンドル接線速度が大きい状態を維持しており、このことがリリース時の初速度を高くすることに繋がったと考えられる。

また、Excellent 群と Normal 群のハンドルの動きの違いを検討するために、回転平面座標系 $X_{icr}Y_{icr}$ 平面上におけるハンマーヘッド速度ベクトルに対するハンドル速度ベクトルのなす角度について検討を行った。その結果、各ターンの極大値出現付近において Excellent 群が小さな値を示した (Fig.6)。このことについて、Excellent 群は Normal 群と比較して、ハンマーヘッドスピード

増加局面（主に DSP）においてハンドル接線速度 (Fig.5c) が大きく、ハンドル法線速度 (Fig.5d) は差が小さかった。すなわち、ハンドル接線速度に対するハンドル法線速度の割合は小さくなるため、回転平面座標系平面上におけるハンマーヘッド速度ベクトルに対するハンドル速度ベクトルのなす角度は小さくなっていったと考えられる (Fig.10)。

さらに、Excellent 群は Normal 群と比較して、回転平面座標系のハンマーヘッドおよびハンドルの絶対速度が大きかったこと (Fig.5c)、および回転平面座標系 $X_{icr}Y_{icr}$ 平面上におけるハンマーヘッド速度ベクトルに対するハンドル速度ベクトルのなす角度は小さかったこと (Fig.6 および Fig.10) を考慮すると、ハンマーヘッドスピード増加時におけるハンマーヘッドの軌道が異なる可能性が考えられる。藤井ほか (2019) は、ハンマーヘッド加速方略について、ハンドル先行距離の獲得パターンから、ハンドル先行距離を増大させることでハンマーヘッドスピードを増加させる局面 (HP—LP) と、ハンドル接線方向速度を増加させてハンマーヘッドスピードを増加させる局面 (LP—Roff) があったことを報告している。このことから、各ターンの HP—LP および LP—Roff の Excellent 群と Normal 群のハンマーヘッド移動距離について検討を行った (Table 1)。その結果、

Fig.10 Difference of handle velocity direction between Excellent group (black line) and Normal group (gray line) on the $X_{icr}Y_{icr}$ plane

Fig.11 Hammer head trajectory on reference coordinate system during HP2 — Roff3 (Excellent group (black line) and Normal group (dot line))

Excellent 群は Normal 群と比較して、各ターンの HP—LP 間のハンマーヘッド移動距離が大きかった。また、Fig.11 に HP2 を基準とした Roff3 までの Excellent 群と Normal 群のハンマーヘッド軌跡（静止座標系 XY 平面上）の平均値を示した。Excellent 群は Normal 群と比較して、HP2—LP2 までのハンマーヘッド移動距離が大きいことが観察された。指導書において、ハンマーヘッドスピード増加に関して、DSP を長くしハンマーヘッドの移動距離を大きくすることが重要であることが指摘されている（室伏，1994）。一方、記録水準の高い競技者ほど、DSP のハンマー方位角変化量、すなわちハンマーヘッドの移動距離が小さくなっていったという報告（Gutierrez-Davila and Rojas-Ruiz, 2005）がみられるように DSP を距離的に長くすることを否定する研究もみられる。本研究も Excellent 群と Normal 群の各ターンにおける DSP のハンマーヘッド移動距離を検討すると、有意差は認められなかった（Table 1）。本研究において、Excellent 群が Normal 群と比較して HP—LP でハンマーヘッド移動距離が大きかった理由の 1 つとして、HP—LP におけるハンドル移動距離が大きかったことが挙げられる（Table 2）。また、記録水準の高い競技者は HP—LP でハンマーヘッドスピードが大きい状態で、そうでない競技者とほぼ同値のハンドル先行距離を獲得していた（Fig.4 および Fig.5(b)）。力学的に求心力は $F = mV^2/r$ （ F : 求心力, m : 質量, V : 速度, r : 曲率半径）で表されることから、ハンマーヘッドスピードが大き

くなるほど、求心力は大きくなる。すなわち、記録水準の高い競技者ほどより大きい求心力を発揮して瞬間回転中心方向へハンマーを牽引し、そうでない競技者とほぼ同値のハンドル先行距離を獲得できていたことが、ハンマーヘッド移動距離を大きくできた 2 つ目の理由として考えられる。これらのことから、Excellent 群は Normal 群と比較して DSP ではなく、HP—LP のハンマーヘッド移動距離が大きくなったと考えられる。したがって、本研究の結果から、ターン開始時点からハンドル接線速度が大きい状態を維持すること、また HP—LP においてハンマーヘッドスピードが大きい状態で、ハンドル先行距離を獲得できるようになることが初速度を高めるために重要であることが示唆された。

2. 異なる記録水準のハンマー投選手のハンドル速度を生成する身体の動きの違い

本研究の第 2 の目的は、ハンドル先行距離を獲得するための身体の動きについて検討することであった。ハンマーヘッドスピード増加時点において、藤井ほか（2010）は、回転平面上におけるハンマーヘッド速度に対する両肩関節中点速度のなす角度について 90—180 度の値を示していたことを報告している。したがって、ハンマーヘッドスピード増加時においては、接線方向の両肩関節中点速度は負の値を示すこととなる。このことから、ハンドル接線速度は、身体の並進運動によって生成されたものではなく、身体の回転運動によって生成されたものと推察される。そこで、藤井ほか（2010）の報告を参考に、両肩関節中点速度は身体の並進運動、 $V_{handle/Msh}$ は主に身体の回転運動（主に肩の回転動作や肩の水平内外転動作）を表すものとして、回転平面座標系におけるそれぞれの速度について検討を行った（Fig.8）。

接線方向のハンドル速度は、 $V_{handle/Msh}$ が大部分を生成し、両肩関節中点速度（ V_{Msh} ）は常に負の値を示していた（Fig.8c, Fig.8a）。また、 $V_{handle/Msh}$ について、Excellent 群は Normal 群と比較してターン開始からリリースまで大きな値を示していた（Fig.8c）。一方、接線方向の両肩関節中点速度に

ついて、両群間に有意差は各ターンの極小値付近のみ認められた (Fig.8a). これらのことから、接線方向のハンドル速度の生成の大部分は、身体の回転運動 (肩の回転や肩の水平内外転動作) によって生成された速度であること、また記録水準による違いは身体の回転運動にあることが示唆された. 藤井ほか (2008a) は、世界一流競技者と日本一流競技者を対象としたハンマーヘッド加速動作について調査しており、Ron 時の肩および腰の回旋角度が小さかった競技者は、DSP における肩と腰の回旋角度変化量が大きかったことを報告している. このことは、体幹が投擲方向へ向いた状態で右足接地を行うことによって、DSP における水平面上の肩と腰の回転量を大きくすることができることを示唆している. 体幹が投擲方向へ向いた状態で右足接地を行うことは、ハンマーヘッドの移動距離を大きくするだけでなく、ターン速度が大きい中でも身体の回転スピードを獲得するために重要な動きであると推察される. これらのことから、競技パフォーマンスと強く関係している接線方向のハンドル速度を高めるためには、水平面上におけるハンマーヘッドおよび体幹を中心とした身体の回転運動を距離的に長く、素早く動かすことが重要であると推察され、そのことが競技パフォーマンス向上に繋がると考えられる. また、DSP を距離的に長く、時間的に長くすることに対して、梅垣ほか (2010) は、右足を早く接地させることだけでなく、右足着地と連動したハンマーを加速するための動作や力の発揮も伴わなければならないと述べている. さらに、梅垣ほか (2012) は、DSP は右足で、SSP は左足でターンの進行方向の力生成をしていたことを報告している. これらのことから、身体の回転スピードを高めるためには、右脚を中心とした下肢動作が重要であると考えられる. したがって、今後、記録水準の高い競技者とそうでない競技者を対象に、ターン動作中における下肢の動きの違いについて検討を行う必要があるものと考えられる.

法線方向のハンドル速度の身体の動きによる生成について、法線方向の $V_{handle/Msh}$ は、各ターンの Roff—LP において値が正の値を示し、LP—Roff

は負の値を示していた (Fig.8d). 一方、法線方向の両肩関節中点速度は、HP 付近で極小値を示し、その後増加し続け、LP—Roff 間にて極大値を示した (Fig.8b). これらのことから、HP—LP における法線方向のハンドル速度の増加は、主に DSP における法線方向の両肩関節中点速度の増加が影響していたと考えられる. そこで、体幹の動きによる法線方向の両肩関節中点速度の獲得について検討した (Fig.9). 法線方向の体幹前後傾動作によって生じた両肩関節中点速度は、全ての DSP と 2 回転目以降の SSP において正の値を示していた (Fig.9b). なお、体幹前後傾角速度も全ての DSP と 2 回転目以降の SSP において正の値 (後傾) を示していた (Fig.9d). また、身体の前傾運動を示す法線方向の両股関節中点速度は DSP (特に LP—Roff 付近) で正の値を示していた (Fig.9a). すなわち、主に体幹の後傾や身体の前傾運動によって、DSP の法線方向の両肩関節中点速度を獲得していたといえる. 指導書においても、身体を後傾させる「身体の倒れ込み」を利用して、ハンマーヘッドを加速させることが有効とされている (室伏, 1994). これらのことから、法線方向のハンドル速度の獲得は、第一に SSP における身体の回転 (肩の水平外転動作を含む) によって生成され、その後 DSP において主に「身体の倒れ込み」や身体の前傾移動による両肩関節中点速度の増加によって、法線方向のハンドル速度を獲得していたと考えられる. また、藤井ほか (2019) は、ターン局面におけるハンドル先行距離の増減と回転平面座標系における法線方向 (瞬間回転中心方向) のハンドル速度の増減パターンが一致していたことを明らかにしている. さらに、法線方向のハンドル速度が増加した局面は、主に各ターンの HP—LP であった (Fig.5d) ことから、ハンドル先行距離は主に身体の前傾動作によって増加させていたと考えられる.

藤井ほか (2010) は、両肩関節中点とハンドルを結ぶ線分を剛体としたモデルを使用して、ハンドル先行距離獲得のための身体の動きについて推察している. そこでは、両肩関節中点にハンドルから両肩関節中点へ向かう方向よりも左肩から右

肩へ向かう方向寄りの力を加えることで、身体重心回りにハンドルを反時計回りに回転させるモーメントが発生し、肩の回転や左肩水平外転動作が起こることによって、結果的にハンドル先行距離が獲得されるとしている。本研究の結果 (Fig.5, Fig.8 および Fig.9) から、ハンドル先行距離の獲得について再検討してみると、まず SSP において、肩の回転や左肩の水平外転動作などによってハンドル法線速度を獲得していた (Fig.8d)。次に DSP 開始時点において、ハンマーヘッドからハンドルに向かう方向より、左肩から右肩に向かう方向寄りに移動させるような力を体幹や下肢で発揮すること (藤井ほか, 2010) によって、身体の回転 (肩の回転や左肩の水平外転動作) だけでなく、身体の倒れ込み動作や並進運動 (法線方向の両肩関節中点速度の生成) が起こることによって、正のハンドル法線速度、すなわちハンドル先行距離の獲得をしていた (Fig.8b, Fig.8d, Fig.9a および Fig.9b)。これらのことから、藤井ほか (2010) が推察していたハンドル先行距離の獲得について定量的 (幾何学的) に明らかにされたといえよう。

HP4—Rel における法線方向の両肩関節中点速度について記録水準による違いに着目すると、Excellent 群が Normal 群と比較して両肩関節中点速度が大きい値を示す区間が多くみられた (Fig.8b)。特に LP4—Rel に関しては、ハンドル先行距離 (Fig.5b) も Excellent 群は Normal 群と比較して、有意に大きい値を示す局面がみられた。この区間は、リリース局面 (振り切り局面) に該当し、ターン動作中において最もハンマーヘッドスピードが増加する時点である。本研究においては、各ターンのハンマーヘッド増加量を算出すると、Excellent 群が Normal 群と比較して、Turn1 と Turn4 において有意に大きい値を示した (Fig.7)。これらのことから、記録水準の高い競技者はそうでない競技者と比較して、リリース局面における法線方向の両肩関節中点速度を大きくすることで、ハンドル先行距離を増加させハンマーヘッドスピードを高めていたといえよう。また、体幹の動きによる法線方向の両肩関節中点速度に着目すると、Excellent 群は Normal 群と比

較して、HP4—Rel の体幹前後傾動作によって生じた法線方向の両肩関節中点速度が大きかった (Fig.9b)。さらに、体幹前後傾角速度に着目すると、Excellent 群は Normal 群と比較して、HP4—Rel の値が大きかった (Fig.9d)。これらのことから、記録水準の高い競技者はそうでない競技者と比較して、リリース局面において体幹後傾角速度を大きくすることで、法線方向の両肩関節中点速度を大きくしていたことも明らかになった。

V 結 論

本研究の目的は、異なる記録水準の競技者間におけるハンマーヘッドスピード増加に影響するハンドル先行距離とハンドルの動きの違いについて検討すること、およびハンドル先行距離を獲得するための身体の動きについて定量的に検討することであった。主な結果は以下の通りである。

- (1) ハンドル先行距離に関しては、記録水準による大きな差はみられなかった。しかしながら、記録水準の高い競技者は回転平面座標系におけるハンドル接線速度が大きかった。
- (2) ハンドル先行距離は、主に両脚支持局面 (DSP) の体幹後傾による両肩関節中点速度の増加によって獲得できる。なお、ハンドル接線速度は主に身体の回転運動によって生成されていた。
- (3) Excellent 群は Normal 群と比較して、各ターンのハイポイント (HP) —ローポイント (LP) 間のハンマーヘッド移動量が大きかった。

これらのことから、ターン開始時点から身体の回転速度を高めることで、ハンドル接線速度が大きい状態を維持できるようになること、ハンマーヘッドスピードが大きい条件下で HP—LP 間のハンドル先行距離を獲得できるようになることが、HP—LP 間のハンマーヘッド移動距離の増大に繋がり、競技パフォーマンス向上に繋がると考えられる。

文 献

- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from computer coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the symposium on close-range photogrammetry*, American Society of Photogrammetry: Falls Church, pp.1-19.
- 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, pp.29-30.
- 坂東美和子・田辺智・伊藤章 (2006) ハンマー投げ記録とハンマーヘッド速度の関係. *体育学研究*, 51 (4): 505-514.
- 藤井宏明・大山卞圭悟・藤井範久 (2019) ハンマー投ターン動作中におけるハンマーヘッドスピード増加に貢献するハンドル先行距離獲得のためのハンドルの動き. *バイオメカニクス研究*, 23 (3): 110-119.
- 藤井宏明・大山卞圭悟・田内健二・持田尚・遠藤俊典・末松大喜・大宮真一 (2008a) ハンマー投における世界一流選手と日本一流選手のバイオメカニクスの分析 (日本陸連科学委員会研究報告). *陸上競技研究紀要*, 4: 128-132.
- 藤井範久・小山陽平・阿江通良 (2008b) ハンマー投げにおけるハンマーヘッド加速に関する研究—力学的観点からの再検討—. *バイオメカニクス研究*, 12 (4): 230-242.
- 藤井範久・小山陽平・阿江通良 (2010) ハンマー投ターン局面におけるハンマーヘッド加速技術の研究—ハンマーヘッド加減速パターンの違いに着目して—. *体育学研究*, 55 (1): 17-32.
- Gutierrez-Davila, M. and Rojas-Ruiz, FJ. (2005) Comparative biomechanical analysis between hammer throwers of different performance levels. *J. Hum.Move.Stud.*, 49 (1): 31-47.
- 池上康男・櫻井伸二・岡本敦・植屋清美・中村和彦 (1994) ハンマー投のバイオメカニクスの研究. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編, 世界一流競技者の技術, 第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス班報告書. ベースボール・マガジン社, pp.240-256.
- 宮西智久・藤井範久・阿江通良 (1996) 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する3次元的研究. *体育学研究*, 41 (1): 23-37.
- 室伏重信・斉藤昌久・湯浅景元 (1982) ハンマー投げのバイオメカニクスの研究—投射時におけるハンマー頭部の初速度・投射角・投射高が飛距離に及ぼす影響—. *中京体育学研究*, 21 (3): 38-43.
- 室伏重信 (1994) ハンマー投げ. *ベースボール・マガジン社*, pp.36-50.
- 岡本 敦・櫻井伸二・小林寛道 (2000) 陸上競技のサイエンス—ハンマー投—. *月刊陸上競技*, 12: 214-217.
- Sprigings, E., Marshall, R., Elliott, B., and Jennings, L. (1994) A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racket-head speed. *J. Biomech.*, 27 (3): 245-254.
- 梅垣浩二・室伏広治・藤井宏明・櫻井伸二・田内健二 (2010) 世界陸上大阪大会の男・女ハンマー投上位8名のバイオメカニクスの特徴. 日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班編, 世界一流競技者のパフォーマンスと技術, 第11回世界陸上競技選手権大阪大会, 日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書. 日本陸上競技連盟, pp.201-211.
- 梅垣浩二・室伏広治・太田 憲・櫻井伸二 (2012) ハンマー投における身体重心—ハンマー間の相対運動—. *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2012*: 265-270.
- Winter, D. A. (2004) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (third edition). John Wiley and Sons, pp.49-50.

(2019年11月8日受付)
(2020年8月4日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2020/8/27