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—

藤井 範久¹⁾ 小山 陽平²⁾ 阿江 通良¹⁾

Norihisa Fujii¹, Yohei Koyama² and Michiyoshi Ae¹: Biomechanical study of techniques for accelerating the hammer head with reference to the speed pattern of the hammer head in the turn phase. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 55: 17-32, June, 2010

Abstract : The purpose of this study was to investigate techniques for accelerating the hammer head in the turn phase of the hammer throw by comparing the motions of hammer throwers. Ten male throwers (PB: 43.15–68.21 m) participated in the study. The hammer motions were videotaped on high-speed VTR cameras (250 or 200 fps), and three-dimensional coordinates were calculated using a DLT method. Various kinematic parameters were calculated, including the hammer head speed, the increase in hammer head speed at each turn phase, the leading distance of the handle (hand), the horizontal abduction/adduction angle of the left arm (shoulder), the twist angle of the trunk, the rotation angle of the pelvis, and the horizontal abduction/adduction angle of the left hip. The fundamental factors and techniques responsible for accelerating the hammer head were as follows: (1) Increasing the acceleration and decreasing the deceleration of the hammer head in the turn phase increased the release speed of the hammer head. (2) A longer positive leading distance of the handle (hand), defined as the distance from the handle to the line connecting the hammer head and the instantaneous center of rotation of the hammer head, had a larger effect on the acceleration of the hammer head in the turn phase. (3) The horizontal abduction of the leading arm (shoulder), the negative trunk twist (recoiling motion), and the sway motion at the midpoint between the two shoulder joints toward the rear and trailing-arm side of the body increased the positive leading distance of the handle by generating the power of the legs and trunk simultaneously.

Key words : hammer head speed, instantaneous center of rotation, leading distance of handle

キーワード : ハンマーヘッド絶対速度, 瞬間回転中心, ハンドル先行距離

1. 緒 言

ハンマーを遠くに投げるためには, リリース時のハンマーヘッド絶対速度を大きくすることが最も重要であるということは数多くの研究で示されている(室伏ほか, 1982; 池上ほか, 1994; 岡本ほか, 2000; 坂東ほか, 2006). 藤井ほか(2008)は, 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でハンマーヘッドを加速する効果が生じると述べている. 池上ほか(1994)は, 競技者や個人内の各ターンによってハンマーヘッド絶対速度の変化パターン, 増加量および減少量が異なることを示し, さらに「他の投擲種目(砲丸投, 円盤投およびやり投)において, 投擲物を保持した手を加速させることで投擲物を加速できるが, (中略)ハンマーの加速には

1) 筑波大学人間総合科学研究科
〒305-8574茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 茨城大学(現一条工務店)
〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1
連絡先 藤井範久

1. *University of Tsukuba, Graduate School of Comprehensive Human Sciences*
1-1-1, Tenno-dai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. *University of Ibaraki (Present affiliation: Ichijo Komuten)*
2-1-1, Bunkyo, Mito, Ibaraki 310-8512
Corresponding author *nfujii@taiiku.tsukuba.ac.jp*

他の投擲種目と異なる原理が働いていると考えられる」とハンマーヘッドを加速する要因の特殊性を述べている。湯浅ほか(1984)は、ハンマー投ではいずれのターンにおいても下肢、体幹、上肢の順に回転運動が起こり、ハンマーヘッドに速度が伝達されていくことが推察できたと述べている。室伏(1994)は、上体を捻り、その捻りを戻すことによって物体を動かすことができると述べている。水谷と梅垣(1997)は、ターン局面での両脚支持局面においてはできるだけ体幹や上肢の姿勢を保ったまま下肢を利用して身体を回転させることが重要であると述べている。Murofushi et al. (2007)は、ターン中にハンマーヘッドを加速させるためには、ハンマーが High point (詳細は後述)を示すときに身体重心が Low point (詳細は後述)を示すような、ハンマーと身体重心の非同期的な動作が必要であると述べている。そして、この動きは、振り子運動の中で、錘が下方に運動する際に紐を上方に引いて振り子の触れ幅を増大させる動きに類似していると述べている。

このように、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できることが明らかになっているが、ハンマーヘッドを加速させるための身体動作については「上体の捻りを戻すことによって物体を動かすことができる」「できるだけ体幹や上肢の姿勢を保ったまま下肢を利用して身体を回転させることが重要である」のように統一した知見は得られておらず、またハンマーヘッド加速量を大きくするための身体動作について詳細に検討された研究は少ない。ハンマーヘッド加速量を大きくするための身体動作を検討するためには、競技成績が異なる被験者の身体動作を分析することも考えられる。しかし、競技成績には身体動作だけでなく筋力などの身体的特徴も影響を及ぼすため、ハンマーヘッド加速量を大きくするための基本的な身体動作を定性的に検討するためには、ターン局面(西藤, 1977; 室伏, 1994)でのハンマーヘッド絶対速度の変化パターン(加速量や減速量

の大きさやその比率)に着目するのがよいと考えられる。

本研究の目的は、男子競技者のハンマー投動作を3次元画像分析し、ターン局面でのハンマーヘッド絶対速度の変化パターンが異なる競技者の身体動作を分析することによって、ターン局面でのハンマーヘッド加速量を大きくするための要因および身体動作を明らかにすることである。

2. 方 法

2.1 被験者およびデータ収集

被験者は、ハンマー投を専門とする男子競技者10名(身長: 1.75—1.85 m, 体重: 85—111 kg, 自己記録: 43.15—68.21 m)であった。10名の被験者のうち3名は2年の間隔(2003年と2005年)をあけて2回の撮影を行い、うち2名はその間に自己記録を更新し、他の1名は投擲技術に変化がみられたため、これらの試技を異なる試技とみなして計13試技を分析対象とした。被験者には研究目的および実験内容を説明し、実験への参加の同意を得た。実験試技は、4回転ターンを用いて、全力で正規の16ポンドのハンマーを投擲することとし、休息をはさみながら3—10回投擲させた。試技の撮影には、ハイスピードVTR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, またはHSV-400, 撮影スピード毎秒200コマ, 露出時間1/2000秒, NAC社製)2台または3台を用いた。

被験者内で最も記録が良い試技,あるいは被験者の内省が良い試技を分析試技とした。撮影したVTR画像をFrame Dias II (DKH社製)を用いて1コマおきに手動でデジタイズし(HSV-500C³, 毎秒125コマ相当; HSV-400, 毎秒100コマ相当), 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。HSV-400による毎秒100コマ相当の2次元座標値を, スプライン関数で補間することで毎秒125コマ相当のデータに変換した。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．なお撮影を5回に分けて行っており，標準誤差の最小値と最大値は，X軸：0.007—0.016 m，Y軸：0.006—0.015 m，Z軸：0.003—0.025 mであった．そして，分析点の座標成分ごとに最適遮断周波数（6.25—8.75 Hz）を決定し（Winter, 2004），Butterworth digital filterを用いて平滑化を行った．なお，上方からみて右方向にターンする被験者については，座標変換することで左方向にターンする被験者として扱った．

2.2 算出項目

2.2.1 動作区分点

スイング後の4回の各ターンで，ハンマーヘッドの鉛直座標値が極大となる時点（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時点（Low point）をLP1, LP2, LP3, LP4とした．なお本研究では，HP1からLP4までを主な分析対象区間とした．

2.2.2 回転平面座標系，ハンドル先行距離，ハンドル先行距離正積分値および負積分値

ハンマー瞬間回転中心（以下「瞬間中心」と略す）およびハンドル先行距離の算出には，藤井ほか（2008）の算出方法を用いた．左手第3指の中指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，対象とする時点およびその前後の時点（前後0.008秒）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，対象とする時点で，ハンマー回転平面内における瞬間中心座標値（ハンマー回転平面内の2成分）とハンマーの回転角速度（1成分）を未知数とし，瞬間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中心座標値として算出した．なお瞬間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，

Fig. 1 Rotating plane of hammer, instantaneous center of rotation, and leading distance of handle

Fig. 2 Integration of leading distance of handle

先行研究（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—7.50 Hz）．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} ，ハンマーヘッドから瞬間中心に向かう方向を Y_{icr} ， X_{icr} と Y_{icr} に直交する方向を Z_{icr} とする移動座標系（以下「回転平面座標系」と略す：Fig. 1(a)）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（Fig. 1(b)）．ハンドル先行距離が正の値を示す時が，ハンドルがハンマーヘッドと瞬間中心を結ぶ線分に対してターンの回転方向に先行している状態（以下「ハンドルの先行」と略す）を表し，負の値を示す時が，ハンマーヘッドが瞬間中心とハンドルを結ぶ線分に対してターンの回転方向に先行している状態（以下「ハンマーヘッドの先行」と略す）を表している．なお，真の瞬間回転中心は上述の方法で算出したハンマー回転平面内からわずかにずれることがあるが（0.001 m 以下），ハンマー回転平面内にあるとして求めた瞬間回転中心をもとに考察することに大きな問題はないことを確認している．

Fig. 2 は，ハンドル先行距離の変化の典型例を示している．縦軸がハンドル先行距離の変化を，横軸が時間を表し，右端がリリース，縦の実線と点線がそれぞれ HP と LP を表している．ハンドル先行距離の変化を隣り合う HP 間でハンドル先行距離が正の値を示す区間のハンドル先行距離を

時間積分することによってハンドル先行距離正積分値を，隣り合う LP 間でハンドル先行距離が負の値を示す区間のハンドル先行距離を時間積分することによってハンドル先行距離負積分値をそれぞれ算出した．なお，本研究ではターン局面に着目しており，ハンドル先行距離正積分値は13試技3区間の計39データ，ハンドル先行距離負積分値は4区間の計52データである．

2.2.3 ハンマーヘッド絶対速度，加速量および減速量

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し，合成することでハンマーヘッド絶対速度を算出した．またターンごとのハンマーヘッド絶対速度の極大値から直前の極小値を減じることによってハンマーヘッド絶対速度の増加量（以下「ハンマーヘッド加速量」と略す）を算出した．同様にして，ターンごとの速度の極小値から直前の極大値を減じることによってハンマーヘッド絶対速度の減少量（以下「ハンマーヘッド減速量」と略す）を算出した．また，ターン局面の3区間のハンマーヘッド加速量を総計することによりターン局面での総ハンマーヘッド加速量を，同様に4区間のヘッド減速量を総計することによりターン局面での総ハンマーヘッド減速量を算出した．さらに，ターン局面での総ヘッド加速量と総減速量を合計することにより，ターン局面での正味のハンマーヘッド加速量を算出した．

2.2.4 上胴座標系および下胴座標系

Fig. 3 は，体幹に設定した上胴座標系および下胴座標系を示したものである．左右股関節中点から左右肩関節中点に向かうベクトルを Z_{ut} ，左肩関節から右肩関節に向かうベクトルを X'_{ut} とした． Z_{ut} と X'_{ut} との外積により Y_{ut} を， Y_{ut} と Z_{ut} の外積により X_{ut} をそれぞれ算出し， X_{ut} ， Y_{ut} ， Z_{ut} からなる移動座標系を上胴座標系とした．同様に，左右股関節中点から左右肩関節中点に向かうベクトルを Z_{lt} ，左股関節から右股関節に向かうベクトルを X'_{lt} とした． Z_{lt} と X'_{lt} との外積により Y_{lt} を， Y_{lt} と Z_{lt} の外積により X_{lt} をそれぞれ算出し， X_{lt} ， Y_{lt} ， Z_{lt} からなる移動座標系を下胴座標系とした．

- ① Midpoint of shoulder joints ② Right shoulder joint ③ Left shoulder joint
④ Midpoint of hip joints ⑤ Right hip joint ⑥ Left hip joint

Fig. 3 Reference frame on upper/lower torso

Fig. 4 Angle definitions

2.2.5 関節角度および運動方向角度

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できることが明らかになっている（藤井ほか，2008）．そして，ハンマーヘッドの回転にともなう遠心力に抗するための技術的要因（Murofushi et al., 2007）も存在するが，本研究では，ハンド

ルを先行させる可能性がある身体部分の動きや関節運動を分析パラメータとした．

(1) 左腕水平内外転角度

Fig. 4(a)は，左腕水平内外転角度の定義を示したものである．上胴座標系の $X_{ut}Y_{ut}$ 平面に，左肩関節から左手関節に向かうベクトルと左肩関節から右肩関節に向かうベクトルをそれぞれ投影し，投影された二つのベクトルがなす角を左腕水

平内外転角度とした．角度が増加する動作を左腕の「水平外転動作」、減少する動作を「水平内転動作」とした．

(2) 体幹捻り角度

Fig. 4(b)は、体幹捻り角度の定義を示したものである．下胴座標系の $X_{lt}Y_{lt}$ 平面に、左肩関節から右肩関節に向かうベクトルと左股関節から右股関節に向かうベクトルをそれぞれ投影し、投影された二つのベクトルがなす角を体幹捻り角度とした．二つのベクトルが平行の時を 0 度とした．右肩関節が右股関節に対して後方（左肩関節が左股関節に対して前方）に位置する時に正の値を示し、この姿勢を「後方捻り」とした．右肩関節が右股関節に対して前方（左肩関節が左股関節に対して後方）に位置する時に負の値を示し、この姿勢を「前方捻り」とした．角度が増加する動作を「捻り動作」、減少する動作を「捻り戻し動作」とした．

(3) 肩回転角度

Fig. 4(c)は、肩回転角度の定義を示したものである．回転平面座標系の $X_{icr}Y_{icr}$ 平面に、左手関節からハンマーヘッドに向かうベクトルと右肩関節から左肩関節に向かうベクトルを投影し、投影された二つのベクトルがなす角を肩回転角度とした．角度が増加する動作は両肩を結ぶ線分がハンマーヘッドの回転方向に回旋する動作であり、「上胴の回旋」とした．

(4) 腰回転角度

Fig. 4(d)は、腰回転角度の定義を示したものである．回転平面座標系の $X_{icr}Y_{icr}$ 平面に、左手関節からハンマーヘッドに向かうベクトルと右股関節から左股関節に向かうベクトルを投影し、投影された二つのベクトルがなす角を腰回転角度とした．角度が増加する動作は右腰をハンマーヘッドの回転方向に移動させる動作であり、「腰の追い抜き動作」とした．

(5) 左股関節水平内外転角度

Fig. 4(e)は、左股関節水平内外転角度の定義を示したものである．下胴座標系の $X_{lt}Y_{lt}$ 平面に、左股関節から右股関節に向かうベクトルと左股関節から左膝関節に向かうベクトルを投影し、

投影された二つのベクトルがなす角を左股関節水平内外転角度とした．角度が増加する動作を左股関節の「水平外転動作」、減少する動作を左股関節の「水平内転動作」とした．

(6) 左下腿内外旋角度

Fig. 4(f)は、左下腿内外旋角度の定義を示したものである．下胴座標系の $X_{lt}Y_{lt}$ 平面に、左股関節から左膝関節に向かうベクトルと左足踵から左足つま先に向かうベクトルを投影し、投影された二つのベクトルがなす角を左下腿内外旋角度とした．角度が増加する動作を「外旋動作」、減少する動作を「内旋動作」とした．

(7) ヘッド速度-肩中点速度角度

Fig. 4(g)は、ヘッド速度-肩中点速度角度の定義を示したものである．回転平面座標系の $X_{icr}Y_{icr}$ 平面に、ヘッド速度ベクトルと右肩関節と左肩関節の midpoint の速度ベクトルを投影し、投影された二つのベクトルがなす角をヘッド速度-肩中点速度角度とした．

3. 結 果

3.1 ハンマーヘッド加速量および減速量

Table 1 は、リリース時のハンマーヘッド絶対速度、分析記録、スイング局面ハンマーヘッド絶対速度、ターンごとのハンマーヘッド加速量および減速量、リリース局面でのハンマーヘッド加速量、ターン局面での総ハンマーヘッド加速量、総ハンマーヘッド減速量および正味のハンマーヘッド加速量を、全被験者について示したものである．被験者 A と被験者 L、被験者 C と被験者 D、被験者 H と被験者 J はそれぞれ同一の被験者であるが、方法で述べたように異なる試技として分析を行った．

リリース時のハンマーヘッド絶対速度 (20.14—25.99 m/s) と分析距離 (40.34—64.38 m) の間には、有意な正の相関関係 ($r = 0.986$, $p < 0.001$, $n = 13$) がみられた．第 2 ターンのハンマーヘッドの絶対速度が減少する局面以降、ハンマーヘッド減速量と次の局面におけるハンマーヘッド加速量、ハンマーヘッド加速量と次の局面に

Table 1 Summary of trial record, release speed of hammer head, decrement, increment, summation of head speed

Subject/Trial ID	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Release speed (m/s)	24.16	23.78	20.14	21.02	20.48	22.45	22.30	23.24	23.60	23.72	23.95	24.31	25.99
Record (m)	57.35	55.63	40.34	43.04	44.17	48.70	48.03	53.16	53.36	55.92	59.63	57.38	64.38
Maximum speed in swing phase (m/s)	14.54	11.76	10.44	11.55	12.32	11.52	12.47	13.31	12.51	13.26	15.10	13.42	15.00
Decrement of speed in 1st turn phase (m/s)	-1.63	-0.26	-0.41	-0.51	-1.45	-0.39	-0.89	-0.74	-1.17	-0.93	-1.23	-0.72	-0.32
Increment of speed in 1st turn phase (m/s)	5.16	3.91	3.16	3.49	3.93	3.96	3.69	4.65	5.67	5.24	4.49	4.62	4.44
Decrement of speed in 2nd turn phase (m/s)	-2.29	-0.74	-1.00	-1.27	-1.79	-0.94	-1.36	-0.63	-1.54	-1.54	-2.05	-0.83	-0.97
Increment of speed in 2nd turn phase (m/s)	4.49	3.94	4.07	3.96	4.34	3.49	3.31	3.12	4.58	3.42	4.42	3.42	3.46
Decrement of speed in 3rd turn phase (m/s)	-2.42	-0.71	-1.54	-1.86	-2.45	-1.91	-1.63	-1.00	-2.27	-1.56	-2.40	-1.46	-1.69
Increment of speed in 3rd tur phase (m/s)	4.18	3.28	3.67	3.26	3.78	3.87	3.85	2.18	3.82	2.95	3.83	3.16	3.05
Decrement of speed in 4th turn phase (m/s)	-3.19	-1.47	-2.31	-2.19	-2.28	-2.72	-2.54	-1.66	-2.54	-1.80	-3.36	-2.12	-2.39
Increment of speed in release phase (m/s)	5.32	4.07	4.06	4.59	4.08	5.57	5.40	4.01	4.54	4.68	5.15	4.82	5.41
Summation of decrement of speed in turn phase (m/s)	-9.53	-3.18	-5.26	-5.83	-7.97	-5.96	-6.42	-4.03	-7.52	-5.83	-9.04	-5.13	-5.37
Summation of increment of speed in turn phase (m/s)	13.83	11.13	10.90	10.71	12.05	11.32	10.85	9.95	14.07	11.61	12.74	11.20	10.95
Net increment of speed in turn phase (m/s)	4.30	7.95	5.64	4.88	4.08	5.36	4.43	5.92	6.55	5.78	3.70	6.07	5.58

Same subject: trials A and L, trials C and D, trials H and J

おけるハンマーヘッド減速量の間には、それぞれ有意な負の相関関係 ($r = -0.667$ — -0.751 , $p < 0.01$ — 0.05 , $n = 13$) がみられた。ターン局面での総ハンマーヘッド加速量と総ハンマーヘッド減速量の間には、有意な負の相関関係 ($r = -0.793$, $p < 0.01$, $n = 13$) がみられた。また、スイング局面のハンマーヘッド絶対速度とリリース時のハンマーヘッド絶対速度の間にも、有意な正の相関関係 ($r = 0.785$, $p < 0.01$, $n = 13$) がみられた。

以後本研究では、リリース時のハンマーヘッド絶対速度が24.16 m/s、分析記録が57.35 mである被験者Aおよびリリース時のハンマーヘッド絶対速度が23.79 m/s、分析記録が55.63 mである被験者Bを典型例として結果を示していく。被験者Aのリリース時のハンマーヘッド絶対速度は、13試技中4番目に大きく、分析記録は3番目に大きかった。被験者Bのリリース時のハンマーヘッド絶対速度は、13試技中6番目に大きく、分析記録は6番目に大きかった。被験者Aは、ターン局面での総ハンマーヘッド加速量が分析試技中2番目に大きく、総ハンマーヘッド減速量が最も大きく、言い換えるとハンマーヘッド絶対速度の増減が大きかった被験者である。被験者Bは、ターン局面での総ハンマーヘッド加速量が分析試技中8番目に大きく、ハンマー

ヘッド総減速量が最も小さく、ターン局面での正味のハンマーヘッド加速量が最も大きかった。上述したようにターン局面での総ハンマーヘッド加速量と総ハンマーヘッド減速量の間には有意な負の相関関係がみられたことを考えると、被験者Aは、平均的なハンマーヘッド絶対速度の増加と減少を繰り返した被験者といえる。一方、被験者Bは、ハンマーヘッドの減速を抑えながらターン局面でハンマーヘッド絶対速度を最も大きく増加させた被験者であり、本研究の被験者の中では特異な絶対速度の変化パターンを示した被験者といえる。また他の被験者は、定性的には被験者Aと被験者Bの中間に位置する被験者であると考えられ、異なる特徴を持つ被験者Aおよび被験者Bを典型例として動作を総合的に考察することで、ターン局面でのハンマーヘッド加速技術を考察できると考えられる。

3.2 ハンドル先行距離正積分値、ハンドル先行距離負積分値、ハンマーヘッド加速量およびハンマーヘッド減速量

Fig. 5 上段は、ハンドル先行距離正積分値とハンマーヘッド加速量との関係を示したものである。ハンドル先行距離正積分値とハンマーヘッド加速量の間には有意な正の相関関係がみられた ($r = 0.462$, $p < 0.01$, $n = 39$)。Fig. 5 下段は、ハ

ンドル先行距離負積分値とハンマーヘッド減速度との関係を示したものである。ハンドル先行距離負積分値とヘッド減速度との間には有意な正の相関関係がみられた ($r=0.754$, $p<0.01$, $n=52$)。

Fig. 5 Relationships between increase/decrease in head speed and integration of positive/negative leading distance of handle

3.3 ハンドル先行距離、左腕水平内外転角度と肩回転角度

Fig. 6 は、ハンドル先行距離（実線）、左腕水平内外転角度（破線）および肩回転角度（点線）の変化を、被験者 A および被験者 B を典型例として示したものである。横軸が時間を、左縦軸が角度を、右縦軸がハンドル先行距離を示し、時間軸の右端がリリースを、縦の実線と点線がそれぞれ HP と LP を表している（Fig. 7, Fig. 8 および Fig. 9 も同様）。

LP と HP の中間付近からハンドル先行距離（実線）が急激に減少する局面で、両被験者とも、左腕水平内外転角度（破線）は減少した。ハンドル先行距離が極小値を示し、その後に増加に転じる局面（HP 直前）では、両被験者とも、左腕水平内外転角度も極小値を示した後に増加しはじめた。さらにその後、ハンドル先行距離は増加し、同時に左腕水平内外転角度が減少する局面では、肩回転角度（点線）が増加していた。LP 付近のハンドル先行距離が極大値を示す時点の前後では、左腕水平内外転角度が減少するターン（被験者 A の第 1—3 ターン、被験者 B の第 1 ターン）、増加するターン（被験者 B の第 2 ターン）、角度変化が停滞するターン（被験者 B の第 3 ターン）など、様々な変化がみられた。

Fig. 6 Leading distance of handle, horizontal abduction/adduction angle of left arm, and rotation angle of shoulder

Fig. 7 Leading distance of handle, twist angle of trunk, and rotation angle of pelvis

ターン局面において、肩回転角度が増加する時は左腕水平内外転角度が減少し、肩回転角度が減少する時は左腕水平内外転角度が増加するというような、逆位相の変化パターンを示す局面が多くみられた。

3.4 ハンドル先行距離、体幹捻り角度および腰回転角度

Fig. 7は、ハンドル先行距離（実線）、体幹捻り角度（破線）および腰回転角度（点線）の変化を、被験者Aおよび被験者Bを典型例として示したものである。

LP直前のハンドル先行距離（実線）が増加する局面では、被験者Aの体幹捻り角度（破線）は増減が抑えられており、被験者Bの体幹捻り角度は減少した。LP直後のハンドル先行距離が減少する局面では、体幹捻り角度も減少傾向を示した。すなわち、被験者Bの体幹捻り角度はLP直前から減少し続けていたことになる。また、ハンドル先行距離の極小値の絶対値が大きな値を示す、言い換えるとヘッドの先行が大きな被験者Aの第1—3ターンでは、HP直前のハンドル先行距離が負の値を示す時点から極小値にかけて、体幹捻り角度は増加していた。

HP直後、腰回転角度が増加する局面では、被験者Aの体幹捻り角度は増減が抑えられてお

り、被験者Bの体幹捻り角度は増加した。また、LP直前の腰回転角度が減少する局面でも、被験者Aの体幹捻り角度は増減が小さく、被験者Bの体幹捻り角度は、腰回転角度の減少とともに減少した。

3.5 体幹捻り角度、左股関節水平内外転角度および左下腿内外旋角度

Fig. 8は、体幹捻り角度（実線）、左股関節水平内外転角度（破線）および左下腿内外旋角度（点線）の変化の典型例を示したものである。

体幹捻り角度（実線）の極大値と極小値の差が被験者Bに比べて小さい被験者Aの左股関節水平内外転角度（破線）は、常に90度以下であった。

左下腿内外旋角度（点線）は、ターン毎のHP—LP間およびLP—HP間に2度の極大値を示した。HP付近から左股関節水平内外転角度が増加する局面で、左下腿内外旋角度が増減した（被験者Aの第2および3ターン、被験者Bの第2および3ターン）。

3.6 ハンドル先行距離およびヘッド速度-肩中点速度角度

Fig. 9は、ハンドル先行距離（実線）とヘッド速度-肩中点速度角度（破線）の変化の典型例を

Fig. 8 Horizontal abduction/adduction angle of left hip, medial/lateral rotation angle of left shank and twist angle of trunk

Fig. 9 Angle between head velocity and velocity of midpoint of shoulder joints and leading distance of handle

示したものである。ヘッド速度-肩中点速度角度が0度—180度のとき、投擲者の上体（両肩関節の midpoint）がハンマーヘッドから遠ざかるような速度を持っていることを示しており、180度—360度のとき、投擲者の上体がハンマーヘッドに近づくような方向に速度を持っていることを示している（実際の投擲では、上体とハンマーヘッドの距離の変化は小さい）。また、ヘッド速度-肩中点速度角度が180度を示す方向がハンマーヘッド速度ベクトルとは逆方向に上体の速度ベクトルが向い

ていることを示している。

ハンドル先行距離が極大値を示す時点付近で、ヘッド速度-肩中点速度角度は90度—180度の範囲であった。ハンドル先行距離が負の値を示した時点でヘッド速度-肩中点速度角度は、被験者Aのターンではほぼ180度であり、被験者Bのターンではわずかであるが180度より大きかった。

4. 考 察

4.1 ハンマーヘッド加速量および減速量とハンマーヘッド加速技術

リリース時のハンマーヘッド絶対速度と分析記録の間には有意な正の相関関係がみられ、これまでの報告（池上ほか，1994）と同じ傾向を示した。したがって，リリース時のハンマーヘッド絶対速度の増大が，投擲記録を決定する主要な要因であるといえる。またターン局面でのハンマーヘッド加速量とハンマーヘッド減速量の間には有意な負の相関関係がみられたこと，同時に総ハンマーヘッド加速量と総ハンマーヘッド減速量の間にも有意な負の相関関係がみられたことから，ターンごとの加速局面で大きな加速量を得ようとする動作は，次の減速局面におけるハンマーヘッド減速量も大きくする動作につながる可能性を示している。しかし，完全に比例関係にあるわけではなく，また加速局面においてハンマーヘッド加速量を大きくする動作技術を明らかにできれば，ハンマーヘッド減速量も大きくなったとしても，全体としては相関関係を保ちながらもターン局面における正味のハンマーヘッド加速量を大きくできる可能性がある。そして，被験者 A と被験者 B を典型例としてハンマーヘッド絶対速度が増加する際の動作，減少する際の動作を総合的に考察することで，ハンマーヘッド加速技術を明らかにできると考えられる。なお，スイング局面のハンマーヘッド絶対速度とリリース時のハンマーヘッド絶対速度の間にも有意な相関関係がみられたが，被験者の筋力や体重などの身体的特徴を含めて検討する必要がある，今後の研究課題であろう。

4.2 ハンマーヘッド加速量およびハンマーヘッド減少量とハンドル先行距離

被験者 A および被験者 B のハンマーヘッド絶対速度の変化をみると（Table 1），ターン局面でのハンマーヘッド総加速量では，被験者 A が被験者 B に比べて 2.70 m/s 大きく，ハンマーヘッド総減速量の絶対値では，被験者 A が被験者 B

に比べて 6.35 m/s 大きかった。正味のハンマーヘッド加速量では，被験者 B が被験者 A に比べて 3.65 m/s 大きかった。したがって，ターン局面での正味のハンマーヘッド加速量を大きくするためには，まずターン毎のハンマーヘッド加速量およびターン局面でのハンマーヘッド総加速量を大きくすることが重要であると考えられるが，同時にターン毎のハンマーヘッド減速量およびターン局面でのハンマーヘッド総減速量を小さくすることも重要であると考えられる。

藤井ほか（2008）は，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，逆に，ハンマーヘッドが先行する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減速させる効果が生じると述べている。さらに本研究では，ハンドル先行距離正積分値とヘッド加速量との間には有意な正の相関関係（ $r = 0.462$, $p < 0.01$: Fig. 5 上段図），またハンドル先行距離負積分値とヘッド減速量との間には有意な正の相関関係（ $r = 0.754$, $p < 0.01$: Fig. 5 下段図）がみられた。したがって，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中心を結ぶ線分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ことが考えられる。同様に，ハンマーヘッド減少量を小さくするためには，ハンマーヘッドが距離的にも時間的にも長く先行するのを避けることが重要であろう。

4.3 ハンドル先行距離の増減と左腕，体幹の動きとの関連

ハンドル先行距離が極小値を示した直後，ハンドル先行距離が増加する時に左腕水平内外転角度は増加した（左肩関節の水平外転動作に相当）（Fig. 6）。またその後，ハンドル先行距離は増加し，同時に左腕水平内外転角度が減少する局面では，肩回転角度が増加した（Fig. 6）。さらに，LP 直前まではハンドル先行距離が増加または比較的大きな値を維持している局面では，体幹捻り

Fig. 10 Combined movements of horizontal abduction of left arm and rotation of shoulder

角度は、増減が抑えられているか（被験者 A）または減少した（被験者 B）（Fig. 7）。左腕水平内外転角度の増加，肩回転角度の増加，体幹捻り角度の減少は，ハンドルをハンマーヘッドと瞬間中心を結ぶ線分に対して先行させる方向への運動である（Fig. 10(a)）。したがって，左腕（肩関節）の水平外転動作がハンドルを先行させるきっかけであり，その後に肩回転角度の増加や体幹捻り角度の減少（捻り戻し）が，ハンドル先行を促進させる動作であると考えられる。なお，被験者 A は，体幹捻り角度の増減を抑え，体幹全体を回転させて肩回転角度を増加させることでハンドル先行距離を増加させており，一方，被験者 B は体幹を捻り戻して肩回転角度を増加させることでハンドル先行距離を増加させていたといえよう。

LP 直後にハンドル先行距離が減少する局面では，被験者 A の体幹捻り角度は増加し，一方被験者 B の体幹捻り角度は減少するまたは増減が小さかった。また被験者 A のハンドル先行距離は $-0.05 \sim -0.1$ m まで減少しており，被験者 B

に比べてハンマーヘッドが大きく先行した状態になっていた。体幹を捻る動作はハンマーヘッドの進行方向の逆方向への動作であるため，被験者 A は LP 直後に体幹を捻ることでハンマーヘッドが大きく先行したと考えられる。しかし，LP 直後には両脚支持から片脚支持に移行して，体幹を回旋させる必要がある。したがって，被験者 A は，体幹を回旋させる際に下胴の回旋を優先して行い，体幹捻り角度を増加したのと考えられる。一方の被験者 B は，LP 前後で体幹捻り角度が減少し続けていることから，上胴の回旋を優先して行い，同時に肩回転角度を増加させることでハンドル先行距離が負にならないようにしていたと考えられる。

詳細にみると，被験者 A の第 3 ターン（1.6—1.7 s）では左腕の水平外転動作および体幹の捻り動作を示し，被験者 A の第 1 ターン（0.3—0.5 s）と被験者 B の第 2 ターン（1.3—1.4 s）では左腕の水平内転動作および体幹の捻り戻し動作を示した。言い換えると，被験者 A の第 3 ターンでは，左腕がハンドルを先行させる動作，体幹がハンマーヘッドを先行させる動作を行っており，また被験者 A の第 1 ターンと被験者 B の第 2 ターンでは，左腕がハンマーヘッドを先行させる動作，体幹がハンドルを先行させる動作を行っており，二つの動作が相殺することでハンドルの先行を距離的に大きくすることができなかったと考えられる（Fig. 10(b), (c)）。さらにはハンマーヘッドを先行させる効果がハンドルを先行させる動作より大きくなれば，ハンドル先行距離を小さくしてしまうと考えられる。またハンドルの先行距離が小さくなる，あるいは変化が緩やかになる時点，たとえば被験者 A の第 2 ターン（1.2 s 付近），被験者 B の第 3 ターン（1.9 s 付近）では，左腕の水平内転動作および体幹の捻り動作を示したが，これらの動作はともにハンマーヘッドを先行させる動作であり，これらの動作が同時に行われることにより，ハンドル先行距離を減少させると考えられる。

ターン局面において，肩回転角度が増加すれば左腕水平内外転角度は減少し，肩回転角度が減少

すれば左腕水平内外転角度は増加するというような変化パターンを示した (Fig. 6). しかし, 指導現場では一般的に「両腕のラインと両肩を結ぶラインがつくる二等辺三角形を崩さない」(室伏, 1994) という指導が行われることも多く, 競技者が能動的に左肘関節を屈曲しながら左腕 (肩関節) の水平外転動作を行い, 右肘関節を屈曲しながら左腕の水平内転動作を行っているとは考えにくい. したがって, 両肩を結ぶラインは完全な剛体ではないため肘関節を屈曲・伸展させることなく左腕水平内外転角度を増減させることも可能であるが, 主として, 左腕水平内転動作は上胴の回旋を強調すること, 水平外転動作は上胴の回旋をとめようとすることによって受動的に生じた動作であると考えられる.

以上のことから, 上胴の回旋をとめることによる左腕の水平外転動作によってハンドルの先行がはじまり, 左腕の水平外転動作と体幹の捻り戻し動作を同時に行うことでハンドルの先行距離を大きくすることができると考えられる. 尾縣 (1990) は, 「ハンマーヘッドの加速は両脚支持の状態で身体の捻り戻しを利用しながらハイポイントに向けてハンマーを振り出すことで行う」と述べている. また, 室伏 (1994) は, 上体を捻り, その捻りを戻すことによって物体を動かすと述べている. 他の指導書でもハンマーヘッドの加速に体幹の捻りおよび捻り戻し動作が重要であると述べられているが, 左腕の動作について指摘したものは見当たらない. 本研究において, ハンマーヘッド絶対速度の増加開始に関わるハンドルの先行開始には, 体幹の捻り戻し動作とともに左腕の水平外転動作が関与し, またハンドルを大きく先行させるためには体幹の捻り戻し動作と左腕の水平外転動作を同時に行うことが重要であると示された.

4.4 体幹の動きと下肢の動きの関連

腰回転角度 (角度増加が腰の追い抜き動作を示す) は, HP 付近から増加しはじめ, LP—HP 間から減少しはじめた (Fig. 7). また, 腰回転角度が大きく増加し始める時点付近から体幹捻り

角度が増加しはじめた. つまり, 腰の追い抜き動作がはじまる時点から, 体幹の捻り動作がはじまった. したがって, LP—HP 間からの腰の追い抜き動作によって体幹の捻りが作られると考えられる.

左股関節水平内外転角度 (角度増加が水平外転動作を, 減少が水平内転動作を示す) について, 体幹捻り角度の極大値と極小値の差が被験者 B に比べて小さい被験者 A の左股関節水平内外転角度は, 常に 90 度以下であった. これは被験者 A の体幹の捻り戻し動作が小さく, 左股関節が常に水平内転位にあったことを示している. 左大腿が固定されていると仮定すると, 左股関節を水平内転させることによって骨盤 (下胴) をハンマーヘッドの進行方向に回旋させることができよう. そして, 左大腿が水平内転位の状態にあれば, 股関節をさらに水平内転させることができる可動域が小さくなり, 大きな骨盤の左回旋を行うことができなかったと考えられる.

左下腿内外旋角度 (角度増加が外旋動作, 角度減少が内旋動作を示す) は, ターン毎の HP—LP 間および LP—HP 間に 2 度の極大値を示した (Fig. 8). HP—LP 間でみられる外旋動作は, 左足つま先を支点として, 左足踵を左回旋させる動作であり, LP—HP 間でみられる外旋動作は左足踵を支点として, 左足つま先を左回旋させる動作である. 左下腿内外旋角度が増加しはじめる時点付近 (HP 付近) から, 左股関節水平内外転角度が増加しはじめた. つまり, つま先を支点とした踵を左回旋させる外旋動作がはじまる時点付近から, 左股関節が水平外転しはじめた. 膝の十字靱帯はどのような肢位であっても緊張状態であるため (Castaing et al., 1986), 下腿を外旋させると, 大腿の外旋および外転が同時に生じやすくなる. したがって左下腿の外旋を行うことで, 左股関節が水平外転を行っていたと考えられる.

以上のことから, 体幹の捻りは腰の追い抜き動作によって作られ, Fig. 11 に示すように, 下腿の外旋動作を行うことで左股関節の水平外転動作が生じ, そして左股関節の水平外転動作によって骨盤の左回旋のための左股関節の水平内転可動域

Fig. 11 Sequential movements of lateral rotation of left shank, horizontal abduction of left hip, and rotation of pelvis

Fig. 12 Rotation mechanism of both shoulder joints-left hand system effected by force at midpoint of both shoulder joints

を確保し、骨盤の左回旋が行いやすくなると考えられる。

4.5 肩関節中点の動き

ハンドル先行距離が極大値を示す時点付近では、ヘッド速度-肩中点速度角度が90度-180度の値を示していた (Fig. 9)。このことからハンドル先行距離が極大値を示す時点付近で、上体はハンマーの遠心力よりも大きな力で引いた結果、上体が背中側に動いていたと考えられる。本研究において、ハンドルが先行している局面、つまりハンマーヘッド絶対速度が増加する局面では、投擲者の上体がハンマーヘッドからハンドルに向かう方向と平行に動いているターンは見当たらず、

ハンマーヘッドからハンドルに向かう方向よりも大きな角度をとって動いていた。前述したように指導現場では「両腕のラインと両肩を結ぶラインがつくる二等辺三角形を崩さないように注意する」と指導がなされる。Fig. 12は、肩関節中点とハンドルを結ぶ線分を剛体とし、肩関節中点に下肢や体幹の動きによって力が加わると仮定した状態を模式的に示したものである。Fig. 12左図では、肩関節中点からハンドルに向かう方向とハンドルからハンマーヘッドに向かう方向は平行であり、身体重心は肩関節中点とハンドルを結ぶ線分内の肩関節中点寄りに位置し、肩関節中点は身体後方に動いていたとする。この状態で、肩関節中点にハンドルから肩関節中点へ向かう方向の力

が加わっても、その力の作用線は身体重心を通り、剛体（身体）を回転させるモーメントは生じない。一方、肩関節中点にハンドルから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（Fig. 12右図）、身体重心を回転中心として、剛体（身体）を反時計回りに回転させるモーメントが生じ、同時にハンドルは反時計回りに回転し始める。またこの力を加え続けることで、肩関節中点は身体の右後方の速度を持つことになり、結果としてヘッド速度-肩中点速度角度が90—180度を示すことになる。室伏（1994）は、「倒れ込みは、次の回転軸に向けて背中を中心に後方に倒れこんでいくようにする。また、上半身の捻り戻しと倒れ込む力が一つになり、それをしない者よりハンマーヘッド絶対速度を増加させることができる」と述べている。これらの指導書では、背中の倒れ込む方向については「次の回転軸に向けて」という表現があるだけで、詳細に述べられていない。本研究で示されたように、肩関節中点を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（身体右後方）に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、ハンドルをより大きく先行させることができると考えられる。また、この肩関節中点の加速度の方向を調節し、左肩関節に作用する関節力および左腕に作用する関節力によるモーメントを制御することによって、上胴の回旋によって生じる左腕の水平内転動作を抑制している可能性があると考えられる。

4.6 ヘッド減速量を小さくする投擲動作への示唆

ターン局面での総ヘッド減速量を小さくするためには、ハンマーヘッドがハンドルおよびハンマー瞬間中心を結ぶ線分より先行するのを避けることが重要である。このハンマーヘッドの先行距離を短くするためには、ハンマーヘッド速度ベクトルとは逆方向の運動である左腕の水平内転動作および体幹の捻り動作が同時に行われることを避けるべきであろう。ハンマーヘッドが先行する局面（LP と HP の中間付近から HP にかけて）で

は、全被験者および全ターンで左腕の水平内転動作がみられたことから、体幹の捻り戻し動作を HP 付近まで行い、HP から捻り動作を行うことがターン局面での総ヘッド減速量を小さくするために重要であると考えられる。また、この体幹の捻りは右腰の追い抜き動作によって作られることから、HP 付近から右腰の追い抜き動作を行うことで、体幹の捻り動作の開始を遅らせることができると考えられる。

5. ま と め

本研究の結果と考察から、ターン局面でのハンマーヘッド絶対速度を大きくするための要因および身体動作について以下のことがいえよう。

- (1) ターン局面でのハンマーヘッド加速量を大きくするためには、ハンドルをハンマーヘッドとハンマー瞬間中心を結ぶ線より先行させることが重要である。一方、ヘッド減速量を小さくするためには、ハンマーヘッドがハンドルおよびハンマー瞬間中心を結ぶ線より先行するのを避けることが重要である。
- (2) 左腕の水平外転動作と体幹の捻り戻し動作を同時に行うことおよび肩関節中点をハンマーヘッドからハンドルに向かう方向（身体後方）よりも左肩から右肩に向かう方向寄り（身体右後方）に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。
- (3) 右腰の追い抜き動作を High point 付近から行うことによって、体幹の捻り動作の開始を遅らせ、ハンマーヘッド絶対速度の減少量を小さくすることができる。
- (4) 左足つま先を支点とする左下腿の外旋動作を行い、それによって左股関節の水平外転運動が生じることで、骨盤（下胴）の左回旋を容易に行うことができる。

今後の課題として、本研究ではターン局面のみでの身体動作の分析であったため、スウィング局面あるいはリリース局面での身体動作の検討が必要であろう。また、より記録水準が高い競技者あ

るいは低い競技者を含めて身体動作を検討し、さらに定量的な分析を行うことによって、ハンマーヘッド加速量を大きくするための身体動作をより詳細に明らかにすることができよう。

文 献

- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the ASP Symposium on Close Range Photogrammetry*, 1-19, American Society Photogrammetry, Falls Church.
- 坂東美和子・田辺 智・伊藤 章 (2006) ハンマー投げの記録とハンマーヘッド速度の関係. *体育学研究*, 51(4): 505-514.
- Castaing, J., Burdin, Ph., Delplace, J., and Le Roy la coll. De JD (1986) 図解〈関節・運動器の機能解剖〉(下巻-下肢編). 井原秀俊, 中山彰一, 井原和彦訳. 70-95, 協同医書出版社, 東京.
- Dapena, J. and Feltner, M.E. (1989) Influence of the direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations during hammer throwing. *J. Biomech*, 22: 565-575.
- 藤井範久・小山陽平・阿江通良 (2008) ハンマー投におけるハンマーヘッド加速要因の再検討—力学的観点からの再検討—. *バイオメカニクス研究*, 12(4): 232-242.
- 池上康男・桜井伸二・岡本 敦・植屋清見・中村和彦 (1994) ハンマー投のバイオメカニクスの研究. *世界一流陸上競技者の技術*. 佐々木秀幸ほか編, 240-256, ベースボール・マガジン社, 東京.
- 水谷好孝・梅垣浩二 (1997) 両足支持期におけるハンマー頭部の移動距離の内訳. *中京大学体育学論叢*, 39(1): 99-105.
- Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K., and Takamatsu, J. (2007) Hammer acceleration due to thrower and hammer movement patterns. *Sports Biomechanics*, 6(3): 301-314.
- 室伏重信・斉藤昌久・湯浅景元 (1982) ハンマー投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*. 東京.
- 尾縣 貢 (1990) ハンマー投. *実戦陸上競技—フィールド編—*. 日本陸上競技連盟: 186-193.
- 岡本 敦・桜井伸二・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.
- 西藤宏司 (1977) 砲丸投げ・ハンマー投げ. *ベースボール・マガジン社*. 東京.
- 湯浅景元・奥山秀雄・室伏重信・斉藤昌久 (1984) ハンマー投げのバイオメカニクスの特性. *体育の科学*, 34(4): 319-322.
- Winter, D.A. (2004) *Biomechanics and motor control of human movement (third edition)*. 49-50, John Wiley & Sons, New York.

(平成21年2月23日受付)
(平成21年11月9日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2010/02/24