

## 投擲者からみたハンマー頭部の加速度について

梅垣浩二, 水谷好孝

### Acceleration of the Hammerhead Relative to the Thrower

Koji UMEGAKI and Yoshitaka MIZUTANI

#### Abstract

The purposes of this paper were to compare kinematic data between a top national athlete and an university athlete, and to resolve the hammerhead acceleration into five components: acceleration of the center of mass of the thrower, coriolis acceleration, centripetal acceleration, tangential and radial acceleration of the hammerhead. The throw was governed mainly by the release velocity of the hammerhead. As the distance between the centers of mass of the thrower and hammer-thrower system of the university athlete was shorter than that of a top national athlete, the center of mass of the university athlete viewed from overhead moved in the direction of the linear trajectory of the center of mass of the hammer-thrower system, while the hammerhead moved from the low-point of its path to the high-point. In general, the thrower retained his balance against the centrifugal force of the hammerhead, and moved and rotated on the throwing circle. The coriolis and tangential components acting at right angles to the vertical plane, which includes the center of mass of the thrower and the hammerhead, were large. The centripetal component acting along the wire length in the vertical plane was also large. The thrower exerted a centripetal force on the hammerhead during the low-point of its path in all turns. The distance between the center of mass of the thrower and the hammerhead decreased in his late turns, and then the angular velocity increased; consequently, the linear velocity increased.

#### 1 目 的

ハンマー投げは、ターンを繰り返すことによってハンマーを加速し、投射したハンマーの飛距離を競う種目である。ターンを繰り返しハンマーを加速するにつれて、投擲者はワイヤーや把手を介して次第に大きな遠心力を受け、バランスを保ちながらサークル内を移動する。

小林と金子<sup>9)</sup>は、投擲者にはたらく外力とし

て遠心力、重力、地面反力の他に慣性力も導入し、静力学の問題としてとらえている。特にハイポイント局面にハイポイントサイドの方向へ身体が移動しており、遠心力の方向にとばされても安定したターンができる能力を獲得することが重要であると述べている。一方池上ら<sup>8)</sup>は、ハンマー頭部の位置と身体重心の移動の関係から、ローポイントの通過前後で回転の中心方向へハンマー頭部を引きつけてハンマーを加

速していると報告している。

Dapena and McDonald<sup>4)</sup> は、身体—ハンマー系の合成重心まわりの系全体の角運動量を求め、角運動量の変化は両脚支持期に両足で鉛直軸まわりのトルクを発揮することと、鉛直方向の地面反力が合成重心まわりにモーメントを生み出すことによると推測している。

このようにハンマー投げにおいて、身体あるいは系全体としては並進運動と回転運動を行っており、遠心力や地面反力と姿勢の動的なバランスを保たなくてはならない<sup>3),6),9)</sup>。つまり動的なバランスを保つとは、身体重心やハンマー頭部の加速度および軸足まわりのモーメントが動作全体を通してなめらかであることと考えられる。

本研究では、本学学生であり現在国内でトップレベルである選手と一般的な選手を被験者とし、運動学的データを比較し、特に選手からみたハンマー頭部の加速度を表すことを目的とする。

## 2 方 法

被験者は実験当時、72.32 m, 56.84 m の最高記録をもつ選手2名であった。それぞれの特徴を表1に示す。試合期終了後(1995年10月31日)に大学陸上競技場において6投の試技を行わせた。その試技を3台の高速度ビデオカメラ(ナック社製: HSV-400, HSV-500)により投擲方向に対して後方および左右側方から撮影した(図1)。200 Hz と 250 Hz で撮影したビデオ画像を1画面とばしでデジタル化した。デジタル化した点は左右手先, 左右手首関節中心, 左右肘関節中心, 左右肩関節中心, 左右股関節中心, 左右膝関節中心, 左右足関節中心, 左右踵, 左右足先, 頭頂点, 左右耳珠中点, 把手の中央

表1 被験者の特徴

被 験 者	A	B
身 長 (cm)	187	181
体 重 (kg)	85	109.5
最高記録 (m)	72.32	56.84

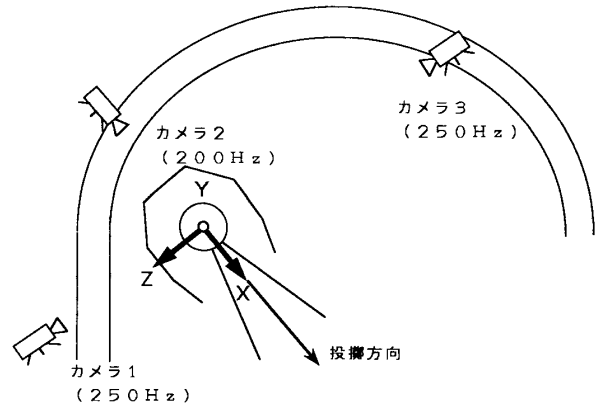


図1 実験場面の模式図

点, ハンマー頭部の中心であった。これらの点をDLT法により実空間座標に変換した。その際カメラ間の同期を行うとともに、それぞれのカメラのデジタイズ値を100 Hzに補間した。分析は被験者本人の内省報告で最もよいと判断された試技(66.57 m と 52.68 m)について行った。

ハンマー頭部と身体重心の速度( $\mathbf{v}$  と  $\mathbf{V}$ )や加速度( $\mathbf{a}$  と  $\mathbf{A}$ )は、以下の式により求められた。

$$\mathbf{v}_i = (2\mathbf{d}_{i+2} + \mathbf{d}_{i+1} - \mathbf{d}_{i-1} - 2\mathbf{d}_{i-2}) / 10 / \Delta t$$

$$\mathbf{V}_i = (2\mathbf{D}_{i+2} + \mathbf{D}_{i+1} - \mathbf{D}_{i-1} - 2\mathbf{D}_{i-2}) / 10 / \Delta t$$

$$\mathbf{a}_i = (2\mathbf{d}_{i+2} - \mathbf{d}_{i+1} - 2\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_{i-1} + 2\mathbf{d}_{i-2}) / 7 / \Delta t^2$$

$$\mathbf{A}_i = (2\mathbf{D}_{i+2} - \mathbf{D}_{i+1} - 2\mathbf{D}_i - \mathbf{D}_{i-1} + 2\mathbf{D}_{i-2}) / 7 / \Delta t^2$$

ただし  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{a}$  や  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{A}$  は慣性系からみたハンマー頭部や身体重心の変位, 速度, 加速度であり, 添字はフレームを表す。 $\Delta t$  はフレーム間の時間を表し, 今回は0.01 sであった。

また地面反力は、以下の式により推定された。

$$\mathbf{F}_i = m(\mathbf{a}_i - \mathbf{g}) + M(\mathbf{A}_i - \mathbf{g})$$

ただし  $m$ ,  $M$  はハンマーと身体の質量,  $\mathbf{g}$  は重力加速度を表す。身体—ハンマー系を質点系とし, 地面反力の作用点を点A, 身体重心を点Cとすると, 点Aは地面という平面内に規定されるので以下の式により点Aを推定することができる<sup>2)</sup>。

$$\mathbf{T}_A = \dot{\mathbf{H}}_C + \mathbf{r}_{C/A} \times \dot{\mathbf{P}}_C$$

ただし  $\mathbf{T}_A$  は点Aまわりの外力によるトルク,  $\mathbf{H}_C$  は重心まわりの角運動量,  $\mathbf{P}_C$  は重心の運動量,  $\mathbf{r}_{C/A}$  は点Aに対する重心の位置を表す。重心まわりの角運動量は湯の方法<sup>10),11)</sup>により求

めた。

一方ハンマー頭部の加速度は、以下の式によっても求められる<sup>2),7)</sup>。

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{A}_i + \dot{\mathbf{r}}_i^{**} + \boldsymbol{\alpha}_i \times \mathbf{r}_i + 2\boldsymbol{\omega}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_i)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = (\mathbf{r}_i \times (\mathbf{v}_i - \mathbf{V}_i)) / |\mathbf{r}_i|^2$$

$$\boldsymbol{\alpha}_i = (2\boldsymbol{\omega}_{i+2} + \boldsymbol{\omega}_{i+1} - \boldsymbol{\omega}_{i-1} - 2\boldsymbol{\omega}_{i-2}) / 10\Delta t$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{d}_i - \mathbf{D}_i$$

$$\dot{\mathbf{r}}_i^* = \mathbf{e}_r (2|\mathbf{r}_{i+2}| + |\mathbf{r}_{i+1}| - |\mathbf{r}_{i-1}| - 2|\mathbf{r}_{i-2}|) / 10\Delta t$$

$$\dot{\mathbf{r}}_i^{**} = \mathbf{e}_r (2|\mathbf{r}_{i+2}| - |\mathbf{r}_{i+1}| - 2|\mathbf{r}_i| - |\mathbf{r}_{i-1}| + 2|\mathbf{r}_{i-2}|) / 7\Delta t^2$$

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{r}_i / |\mathbf{r}_i|$$

ただし  $\boldsymbol{\omega}$  は角速度,  $\boldsymbol{\alpha}$  は角加速度,  $\mathbf{r}$  は身体重心に対するハンマー頭部の位置を表す。また  $\dot{\mathbf{r}}^*$  や  $\dot{\mathbf{r}}^{**}$  は  $\mathbf{r}$  の大きさの変化率やさらにその変化率を表す。また身体重心に対するハンマー頭部の相対速度を, ターンにともなって移動する回転座標系により表した。回転座標系は身体重心を原点とし,  $\mathbf{r}$  と鉛直方向を示すベクトルのなす平面に垂直かつ投擲者からみて左方向を  $\xi$  軸,  $\mathbf{r}$  と鉛直方向を示すベクトルのなす平面にハンマーの把手から頭部を結ぶベクトルを投影した方向を  $\zeta$  軸, 右手系をなす方向を  $\eta$  軸とした。この方が投擲者が感じる加速度の感覚に近い値を示していると考えられるからである。

### 3 結果と考察

#### (1) 投射時の初期条件

それぞれの被験者の投射時の初期条件は, 表 2 に示すとおりであった。投射高は被験者 B の方がやや高く, 投射角度はほとんど差がなかった。ふたりの被験者の記録の差は, 投射時のハンマー頭部の速度の大きさの差によると考えられる。

#### (2) 身体重心や合成重心とハンマーの軌跡

図 2 と図 3 は被験者 A と B の, Y 方向および Z 方向からみた身体重心と身体—ハンマーの合成重心の軌跡を示している。被験者 A は 4 回転の後, 被験者 B は 3 回転の後, 投射している。身体重心の軌跡より, 被験者 B の場合ロー

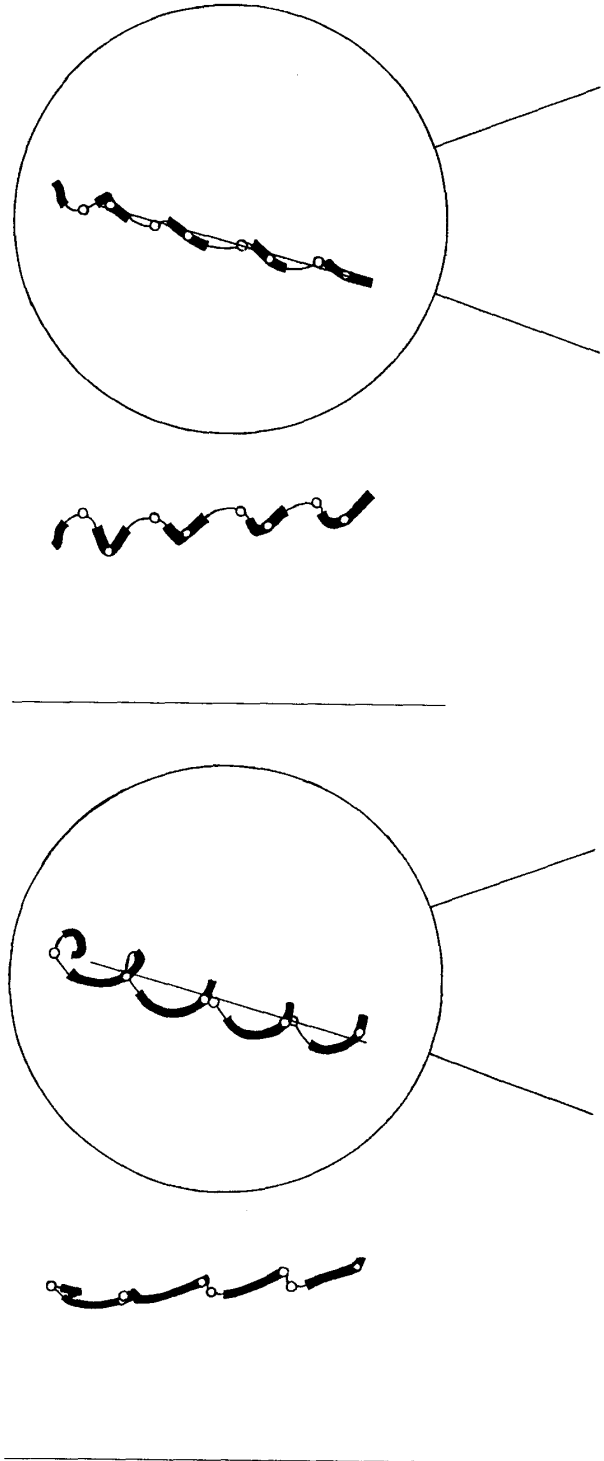


図 2 被験者 A の身体重心と合成重心の軌跡  
 上段から真上からみた, 真横からみた合成重心, そして真上からみた, 真横からみた身体重心の軌跡を示している。太線は両脚支持期の, 細線は片脚支持期の軌跡である。またそれぞれにおける丸印は, ハンマー頭部のローポイントやハイポイントの時点の位置を示している。Y 方向からみた図に示している直線は, 合成重心の軌跡を回帰したものである。

ポイントからハイポイントの局面に合成重心の移動方向へ水平移動していたが、被験者 A の場合むしろ鉛直下方へ移動していた<sup>5)</sup>。図 6 は、身体重心と合成重心の間の距離と回転の角速度を示している。両被験者のグラフの時間軸は、リ

リース直前のフレームを 2.43 s として示されている。今回の被験者の体格はやや異なるが、特に投擲者の質量が同じ場合に、この距離が大きいことは合成重心とハンマー頭部の距離も大きいばかりでなく、結果として上述のようにローポイントからハイポイントの局面に合成重心の移動方向へほとんど水平移動しない<sup>12)</sup>。また図 4 と図 5 は被験者 A と B のハンマー頭部の軌跡を示しており、ターンを重ねるにつれ

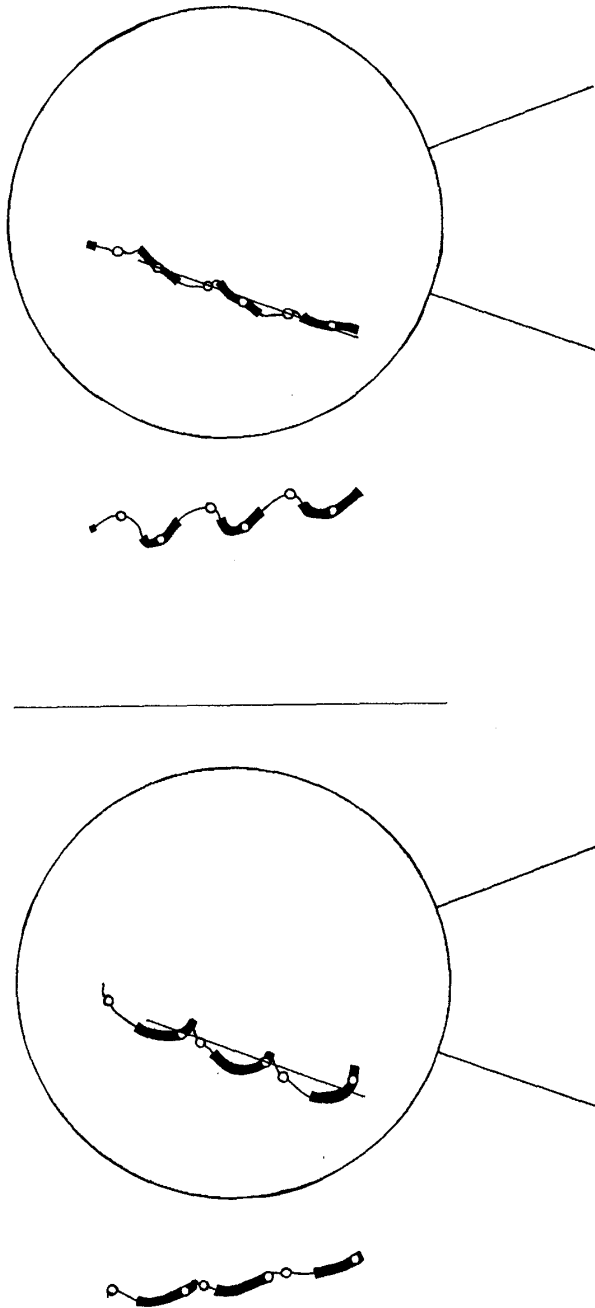


図 3 被験者 B の身体重心と合成重心の軌跡  
説明は図 2 のものを参照。

表 2 投射時の初期条件

被 験 者	A	B
記 録 (m)	66.57	52.68
絶対速度 (m/s)	26.3	23.29
X 方向速度 (m/s)	19.53	17.05
Y 方向速度 (m/s)	17.4	15.84
Z 方向速度 (m/s)	2.7	1.0
投射角度 (°)	41.2	42.8
投 射 高 (m)	1.31	1.41

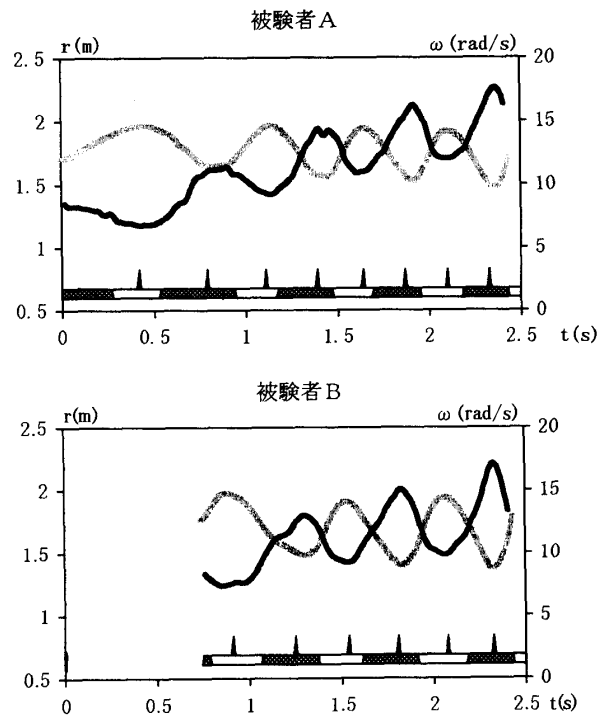


図 6 身体重心とハンマー頭部の距離と両者を結ぶ線分の回転の角速度

灰色線が距離を、黒線が角速度を示している。また図中の下の横棒は支持期を示し、影付きが両脚支持期、白抜きが片脚支持期である。そして各支持期における縦線はハンマー頭部のローポイントやハイポイントの時点を示している。

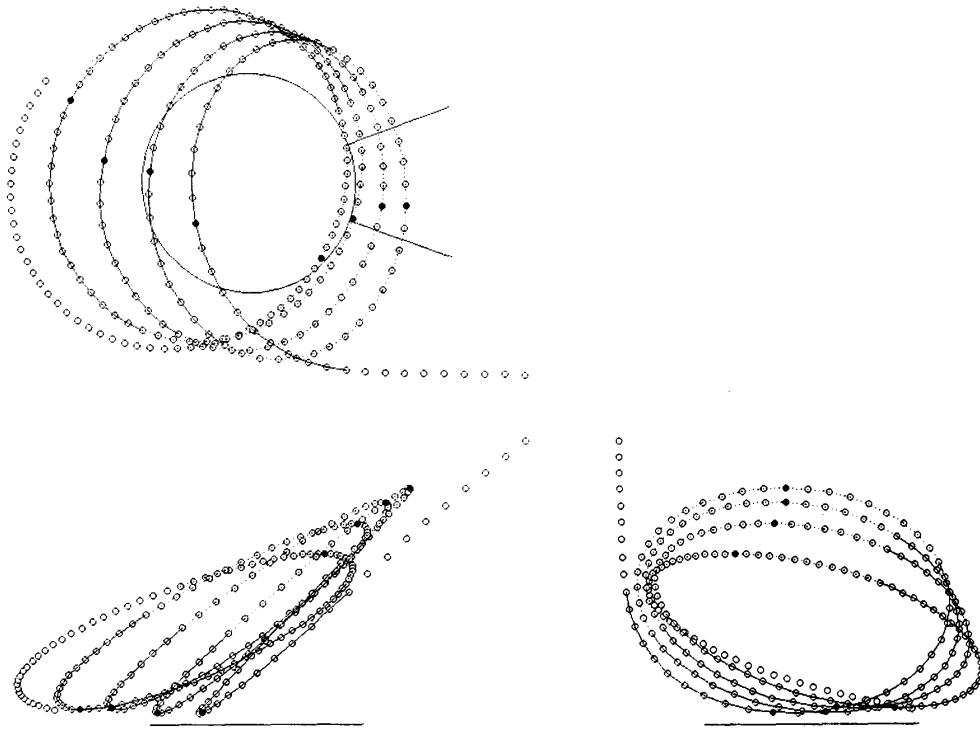


図4 被験者Aのハンマー頭部の移動と軌跡

上段は真上からみた，下段左は真横からみた，下段右は正面（投擲方向）からみたハンマー頭部の移動を示している。実線は両脚支持期の，点線は片脚支持期の軌跡である。また黒抜きのハンマー頭部は，ローポイントやハイポイントの時点の位置を示している。

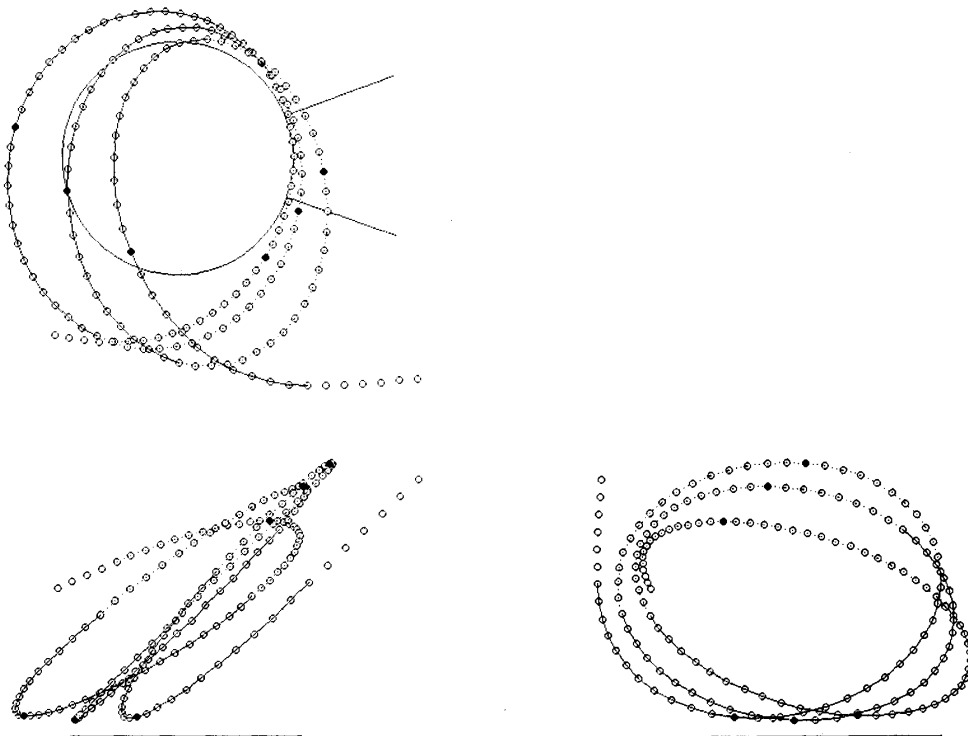


図5 被験者Bのハンマー頭部の移動と軌跡

説明は図4のものを参照。

て軌道面の傾きが大きくなっていくこと、特に被験者 B の場合にローポイントやハイポイントの位置が変わる方向が大きく投擲方向と異なっていることがわかる。室伏<sup>10)</sup>によるとハンマーの運動面が投射方向に対して左に流れる原因として、回転を急ぐあまりハンマーを動かそうとはせずに身体だけを速く回そうとしたり、両脚支持期に長くハンマーを移動させないことをあげている。また右に流れる原因として、右足を早く地面から離してしまったり、左足がよく回っていないことをあげている。

### (3) 地面反力と遠心力

図 7 は、地面反力と遠心力を示している。これらの力の計算は、ハンマー頭部や身体重心の変位の 2 階微分値を用いているので正確な値ではないが、遠心力に抗して地面反力を受けていることがわかる。投擲者を質点系としてみると外力のベクトル和は質量中心にはたらくため、地面反力と遠心力と慣性力の和が零となることより地面反力を求めた<sup>2)</sup>。また質点系について慣性系で移動している点 A まわりの外力によるトルクは、質量中心まわりの角運動量の変化率と、点 A から質量中心のベクトルと質量中心の運動量ベクトルの微分のベクトル積の和として表される<sup>2)</sup>。点 A を圧力中心点(地面反力の作用点)とすると、身体重心まわりの角運動量を求めれば、点 A を推定することができる(図 8)。

図 8 の圧力中心点の移動は、両脚支持期の前半は右足の中心に近く、両脚支持期の後半は左足の中心に近い。しかし片脚支持期では圧力中心点はサークル内をとびだしてしまい現実的でない。これは計算に変位の 2 階微分値を用いているので正確に圧力中心点を推定することはできなかつたと考えられる。また図 8 の圧力中心点まわりのトルクの片脚支持期における値も、非常に大きな値であった。今回のように画像データのみから圧力中心点を推定することは不可能であったが、仮に常に軸足を圧力中心点としよう。左足の中心が地面反力の作用点として、左足中心まわりのトルクを示したものが図 9 で

ある。図 8 のトルクの全体的な傾向とよく似ており、圧力中心点まわりにこの程度のトルクがはたらいっていると推測される。

### (4) 身体重心に対するハンマー頭部の相対加速度

身体—ハンマー系を身体重心とハンマー頭部の 2 質点と考えると、ハンマー頭部の加速度は身体重心の加速度と身体重心に対するハンマー頭部の加速度の和として表すことができる。また 2 質点を結ぶベクトルが並進運動と回転運動を行っていると考え、身体重心に対するハ

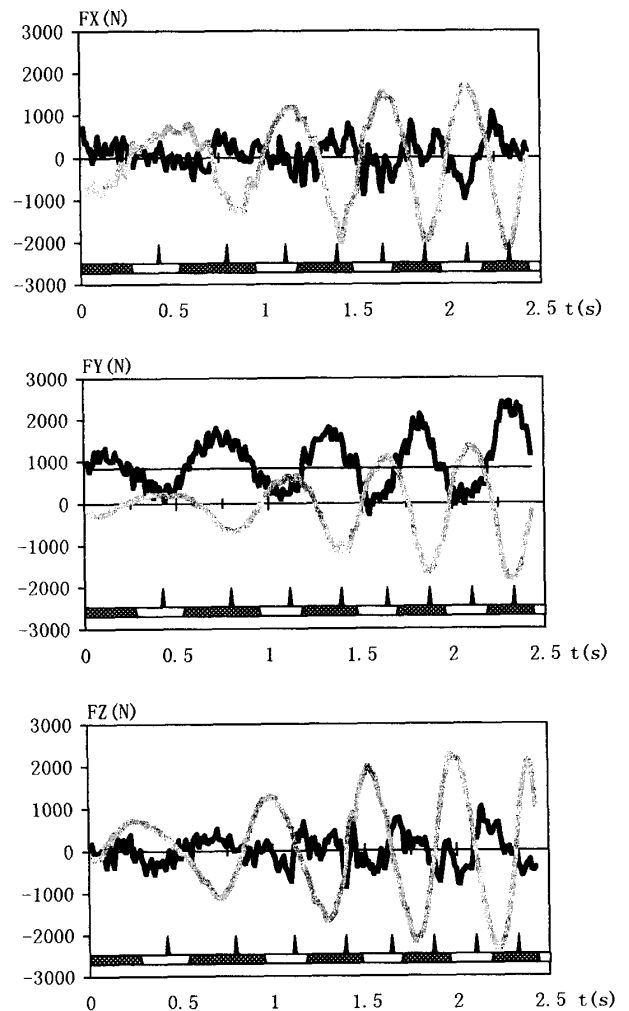


図 7 被験者 A のハンマー頭部の遠心力と地面反力

灰色線が遠心力を、黒線が地面反力を示している。上段から X 方向、Y 方向、Z 方向のそれぞれの力である。また Y 方向の力の図で横方向の直線は、体重の大きさを表す。

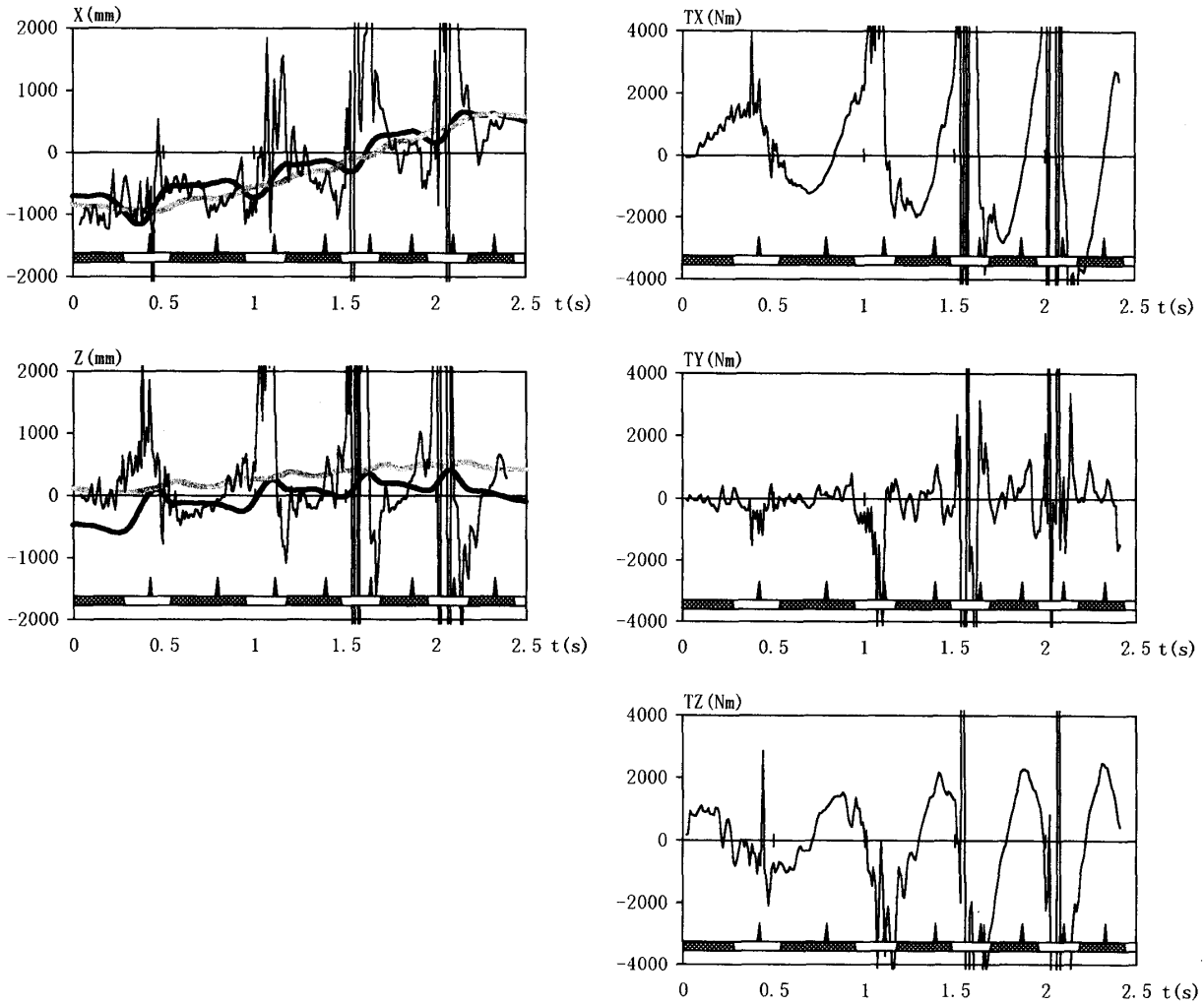


図8 投てき者を質点系とした場合の地面反力の圧力中心点Aと点Aまわりのトルク  
 左側の図の細線は圧力中心点Aの移動を示している。灰色線が左足の(つま先とかかとの)中点の、黒太線が右足の中点の移動を示している。上段がX方向、下段がZ方向である。また右側の図は上段からX軸方向、Y軸方向、Z軸方向のトルクを示している。

ンマー頭部の加速度は、2質点を結ぶベクトルの延長方向に加速するために必要な力に相当する加速度( $\ddot{\mathbf{r}}^{**}$ )と、回転方向に加速するために必要な力に相当する加速度( $\boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r}$ )と、コリオリの加速度( $2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}}^*$ )と、求心加速度( $\boldsymbol{\omega} \times [\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}]$ )の和として表すことができる<sup>7)</sup>。さらに実際に投擲者とハンマー頭部を結ぶものはワイヤーと把手であり、ワイヤーの方向を基準とした回転座標系からみることによって投擲者の感覚に近い加速度を表すことができる。

図10~12は、回転座標系の各軸方向の身体重心に対するハンマー頭部の加速度を表している。ξ軸方向の加速度(図10)は、回転方向に

加速するために必要な力に相当する加速度の成分とコリオリ加速度の成分の位相が逆転しており、常に変動している。ハイポイントからローポイントにかけて回転方向に加速するために必要な力に相当する加速度が正の値を示しており、ローポイントからハイポイントにかけてコリオリの加速度が正の値を示していた。これはハイポイントからローポイントにかけて角速度は大きくなり、身体重心とハンマー頭部の距離は短くなっており、またローポイントからハイポイントにかけて角速度は小さくなり、身体重心とハンマー頭部の距離は長くなっていること(図6)による。

ξ軸方向の加速度(図12)は、ローポイント前後に大きな負の値を、ハイポイントの前後に小さな正の値を示していた。この時身体重心はハンマー頭部と逆の方向の加速度を示していた。負の加速度は求心加速度により、また正の加速度は回転方向に加速するために必要な力に

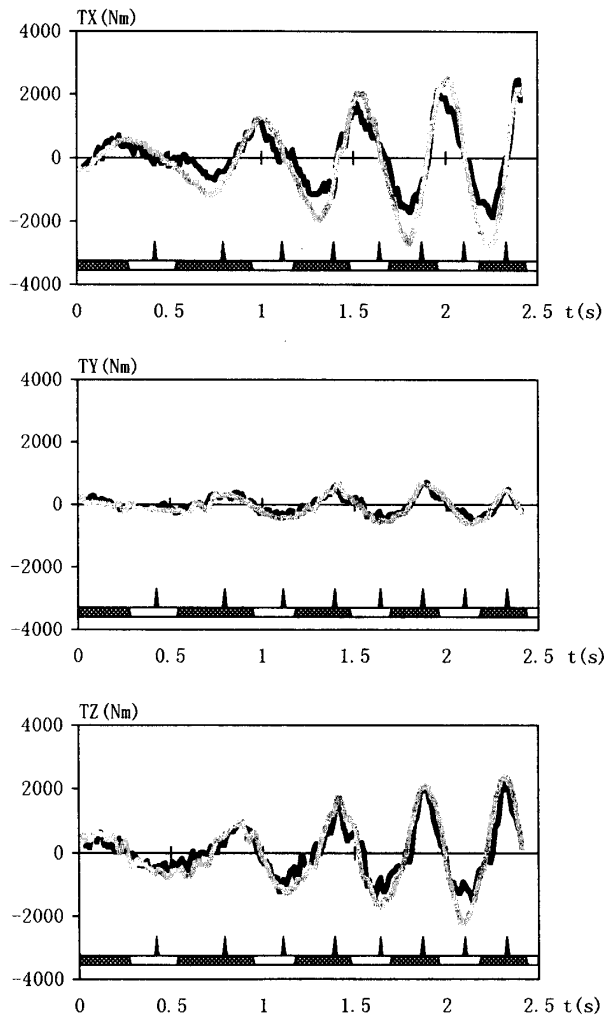


図9 左足の midpoint を圧力中心点と仮定した場合の  
左足の midpoint まわりのトルク

黒線がハンマー頭部の遠心力と身体の重力によるトルクを、灰色線は重心まわりの角運動量の変化と重心の運動量の変化によるトルクを示している。また上段がX軸方向の、中段がY軸方向の、下段がZ軸方向のトルクを示している。相当する加速度による(実際には身体重心とハンマー頭部の距離が長いことによる)と考えら

れる。特にダイソンはハンマー頭部の水平方向の加速について回転軸の移動が重要であると述べており<sup>5)</sup>、今回これを定量的に示すことができた。

#### 4 ま と め

本研究では、本学学生であり現在国内でトップレベルである選手と一般的な選手の運動学的データを比較した。記録は投射時の初期条件、特に初速度の大きさによる。また身体重心と合成重心の距離の短いことは回転の半径が小さいことを意味し、結果としてローポイントからハイポイントにかけて身体重心が合成重心の移動方向へ水平移動する。

投擲者はハンマーの遠心力に抗して地面反力を受け、バランスを保ちながらサークル内を並進および回転運動を行い移動する。投擲者が感じているであろうハンマー頭部の加速度について、身体重心とハンマー頭部を含む鉛直平面に垂直方向(投擲者からみて左方向を正とする)では回転方向に加速するために必要な力に相当する加速度とコリオリの加速度が大きく、この平面内でワイヤーの方向(身体重心からハンマー頭部の方向を正とする)では求心加速度が大きかった。投擲者はローポイントの前後で非常に大きな求心力を発揮し、ターン中に身体重心とハンマー頭部の距離(回転半径)を変化させながら、ターンを重ねるにつれて回転の速度を次第に大きくし、そしてハンマー頭部のスピードを大きくして、投射している。

#### 謝 辞

本実験に被験者としてご協力いただいた本学陸上競技部員の室伏広治君、成瀬真一郎君に謝意を表します。また本実験の撮影は器材等において株式会社ナックのご協力により行うことができました。ここに謝意を表します。



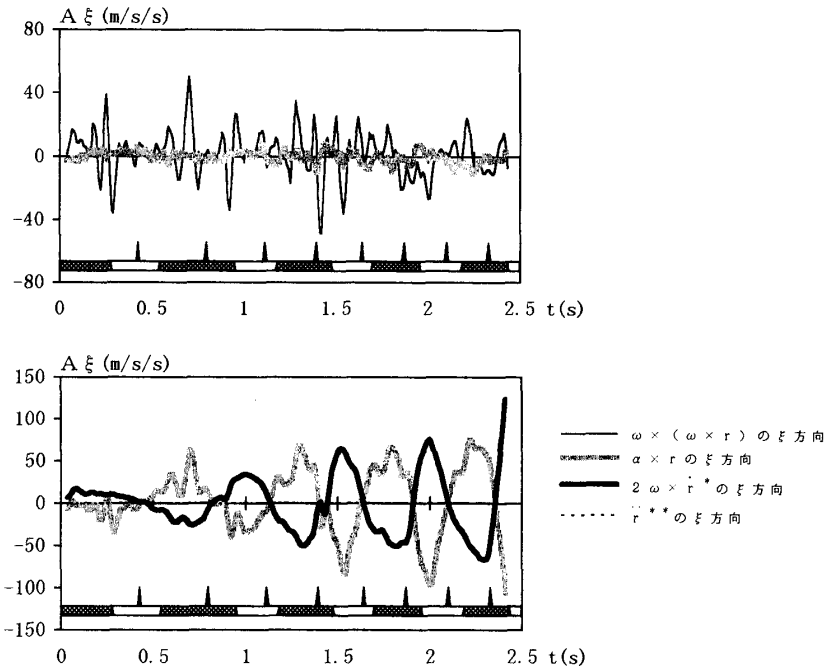


図10 ハンマー頭部と身体重心の、身体重心に対するハンマー頭部の、 $\xi$ 方向の加速度

上段の図は、黒線がハンマー頭部の、灰色線が身体重心の  $\xi$  方向加速度を示している。下段の図は、身体重心に対するハンマー頭部の  $\xi$  方向相対加速度の各成分を示している。

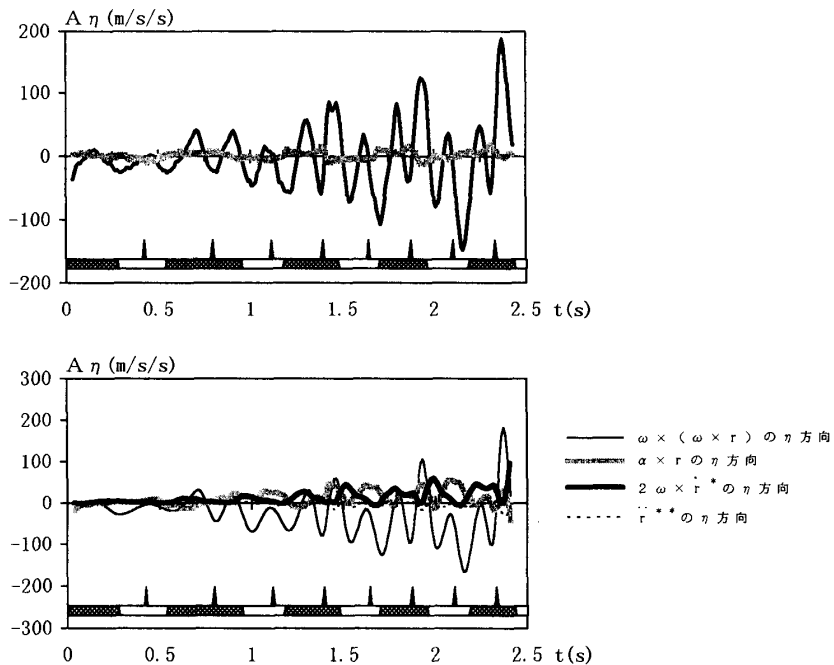


図11 ハンマー頭部と身体重心の、身体重心に対するハンマー頭部の、 $\eta$ 方向の加速度

上段の図は、黒線がハンマー頭部の、灰色線が身体重心の  $\eta$  方向加速度を示している。下段の図は、身体重心に対するハンマー頭部の  $\eta$  方向相対加速度の各成分を示している。

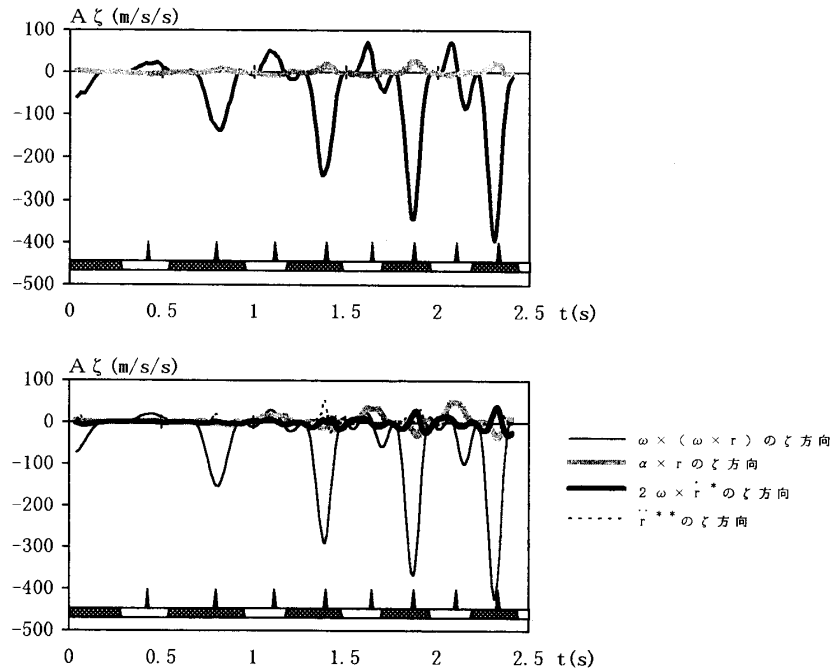


図12 ハンマー頭部と身体重心の、身体重心に対するハンマー頭部の、 $\zeta$ 方向の加速度

上段の図は、黒線がハンマー頭部の、灰色線が身体重心の $\zeta$ 方向加速度を示している。下段の図は、身体重心に対するハンマー頭部の $\zeta$ 方向相対加速度の各成分を示している。

### 参考文献

- 1) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 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 (バイオメカニズム学会編), 23-33, 東大出版会, 1992.
- 2) 有本卓: ロボットの力学と制御, 27-63, 朝倉書店, 1990.
- 3) Dapena, J. and Feltner, M.: Influence of the direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations during hammer throwing. *Journal of biomechanics*, 22, 565-575, 1989.
- 4) Dapena, J. and McDonald, C.: A three-dimensional analysis of angular momentum in the hammer throw. *Medicine and science in sports and exercise*, 22, 206-220, 1989.
- 5) G. ダイソン著, 金原勇, 渋谷侃二, 古藤高良訳: 陸上競技の力学, 231-237, 大修館書店, 1972.
- 6) Hay, J.: The biomechanics of sports technique., 501-510, Prentice hall international editions, 1993.
- 7) 広瀬茂男: ロボット工学, 77-87, 裳華房, 1987.
- 8) 池上康男, 桜井伸二, 岡本敦, 植屋清見, 中村和彦: ハンマー投のバイオメカニクス的分析, 世界一流陸上競技選手の技術 (陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編), 240-256, ベースボール・マガジン社, 1994.
- 9) 小林一敏, 金子今朝秋: ハンマー投げの力学, 体育の科学, 30, 499-503, 1980.
- 10) 室伏重信: ハンマー投げ, 30-52, ベースボール・マガジン社, 1994.
- 11) 湯海鵬: 3次元的人体角運動量の計算法, 体育学研究, 40, 161-169, 1995.
- 12) 梅垣浩二, 水谷好孝: ハンマー投げの運

動学的分析—身体重心や合成重心の動きについて—, 第13回日本バイオメカニクス学

会大会論文集, 1996. (印刷中)