打点高の異なる野球ティー打撃動作における 左右上肢のキネティクスの分析

阿江 数通¹⁾ 小池 関也²⁾ 川村 卓²⁾

Kazumichi Ae¹, Sekiya Koike² and Takashi Kawamura²: Kinetic analysis of individual upper limbs during baseball tee-batting motion at different hitting-point heights. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 431-452, December, 2014

Abstract : The purpose of this study was to clarify the kinetic features of the upper limbs at different hitting-point heights (high, middle, and low) during baseball tee-batting. Twenty-three collegiate male baseball players (age: 19.8 ± 1.3 yr, height: 1.74 ± 0.04 m, weight: 74.1 ± 6.2 kg, athletic career: 12.0 ± 2.1 yr) participated. Three-dimensional coordinate data were captured using a VICON-MX system (12-camera, 250 Hz), and kinetic data for each hand were collected using an instrumented bat equipped with 28 strain gauges (1000 Hz). Three tee-batting heights were set for each subject based on the upper and lower limits of the strike zone according to the rules of baseball. Kinetic variables for the upper limbs, such as joint torque, joint torque power, and mechanical work, were calculated. The period of forward swing motion was divided into down-swing and level-swing phases. The results are summarized as follows: 1) The extension torque and positive torque power at each individual shoulder joint were significantly greater at the low hitting-point height than at other heights. 2) The positive torque power for extension torque at each individual elbow joint in the last half of the down-swing phase was significantly greater at the low hitting-point height than at other heights. 3) Negative power for adduction/abduction torque at each individual shoulder joint in the level-swing phase was observed at the low hitting-point height. 4) The mechanical work done by joint torque about the flexion/extension and adduction/abduction axes at the shoulder, the flexion/extension axis at the elbow, and the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes at the wrist showed large and positive values, and differed significantly among hitting-point heights. These results indicate that 1) the flexion/extension torque at each individual shoulder joint contributes greatly to adjustment of the translational movement of the bat in the vertical direction during the down-swing phase, 2) the adduction/abduction torque at each individual shoulder joint exerts a larger proportion of the longitudinal force of the bat to withstand centrifugal force at a low hitting-point height than at other heights in the level swing phase, and 3) consequently, it tends to be more difficult to adjust the bat to the hitting-point at a low height in comparison with other heights.

Key words : closed loop problem at upper limbs, inverse dynamics calculation, instrumented bat, stationary ball batting

キーワード : 上肢閉ループ問題, 逆動力学演算, センサー・バット, 静止球打撃

1) 筑波大学大学院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) 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 阿江数通

1. Graduate School of Comprehensive Human Sciences,
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. Faculty of Health and Sport Sciences, University of
Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author k_ae@lasbim.taiiku.tsukuba.ac.jp

1. 緒 言

野球の打撃動作において、打者には投手の投球をバットによって正確にミートすること、およびバット・ヘッドスピードを高めて強い打球を得ることが要求される（宮西，2006；川村ほか，2008）．他方、投手には打撃の確実性を低下させるために、様々なコースに投球を行うことが要求される．このため打者は、ボールコースを予測するとともに、直接バットを操作する左右の各上肢をはじめとする身体各関節によって、種々のボールコースに適したスウィング動作を行い、バットのコントロールおよびヘッドスピードの獲得を短時間に実現する必要がある．

野球の打撃動作に関する先行研究では、バット運動と身体各関節、とりわけ上半身の動作とを関連づけたキネマティクスの分析が数多く報告されている（川村ほか，2000, 2001, 2008；田内ほか，2005；宮西，2006；高木ほか，2008, 2010a；宮西・櫻井，2009；Escamilla et al., 2009a, 2009b；石井ほか，2010）．これらの研究では、その打撃条件として飛来球を打撃するもの（宮西，2006；高木ほか，2008；Escamilla et al., 2009a, 2009b）、およびティー台を用いて静止球を打撃するもの（川村ほか，2000, 2001, 2008；田内ほか，2005；石井ほか，2010）があり、各条件ともボールコースあるいは打点位置は一定に設定されている．しかし、実際の試合におけるボールのコースは様々であり、打者には異なるコースに対応した打撃動作が要求されることから、各コース条件における打撃動作に関する技術的な知見が必要になると考えられる．田子ほか（2006a, 2006b）は、異なるコースを想定したティー打撃動作のキネマティクスの分析から、打点高の違いには、上肢および下肢の動作を調整することによって対応し、特に低めの打点高では上肢関節角の調整が重要となること、そして、内外角の違いには、骨盤の回転動作の調整によって対応していることを報告している．そして、このような身体関節の調整には、関節トルクおよび関節力

といったキネティクスの変量が関与している．しかしながら、これまでの多くの研究は、主にキネマティクスの観点から検討したものであり、動作の生成要因を定量化するキネティクスの観点から検討したものではない．

野球の打撃動作におけるキネティクスの分析では、バットおよび左右の上肢、ならびに地面および左右の下肢によって機構的な閉ループが構成され、力とモーメントに対する冗長系となることから、動作の計測のみによる逆動力学的な分析では該当の関節トルクを算出できない閉ループ問題が生じる．このため、下肢および地面による閉ループ問題に対しては、フォースプラットフォームを用いた研究がいくつか報告されている（Messier and Owen, 1985, 1986；小田ほか，1991a, 1991b；Welch et al., 1995；勝又・川合，1996；Katsumata, 2007；高木ほか，2010b；Fortenbaugh et al., 2011）．一方、上肢およびバットによる閉ループ問題に対して、平野（1979）および伊藤ほか（2001）は、左右各手への力の配分、あるいは上肢各関節トルクの配分に対する仮定を設けて各種キネティクスを推定している．これらに対して、Koike et al. (2004) および小池（2010）は、上肢の閉ループ問題を解決可能なセンサー・バットを考案・製作し、これにより左右各手の作用力および作用モーメントの計測を実現している．そして、小池ほか（2003, 2006）および小池・阿江（2012）は、センサー・バットを用いた左右上肢のキネティクスの分析から、作用力としては、主にノブ側（グリップエンド側）手のバット作用力、上肢関節トルクとしては、ノブ側腕の肩関節外転トルクがバットの回転運動により増大する遠心力に抗していると報告している．しかしながら、これらセンサー・バットによるいずれのキネティクスの研究においても、その打点位置は一定に設定されており、異なる打点高に対応した左右上肢のキネティクスの特徴を明らかにしたものではない．

上述したように野球の打撃動作において、打者には様々なコースに対応するためのバット操作が要求される．このため、異なるコースに対応する

ための左右上肢に関するキネティクスの分析を行う意義は大きいといえる。阿江ほか (2013) は、異なるコースを想定した打撃動作におけるキネティクスの分析の第一歩として、異なる打点高条件におけるティー打撃に対する左右各手のキネティクスの分析を行っている。その結果から、打点高への対応には、バット長軸方向作用力の鉛直成分がバットの高さ調整に大きく寄与するとともに、バット起し倒し軸まわりの作用モーメント、およびこの軸まわりのモーメントとして作用する左右各手の偶力成分がバットの過度な下方変位を抑制することに寄与すると報告している。しかしながら、この研究は異なる打点高に対応する際の左右各手のキネティクスの変量を生成する上肢関節の働きについて検討したのではない。したがって、この上肢関節のキネティクスの特徴について明らかにすることは、野球打撃動作における指導への示唆あるいは競技力の向上のための新たな知見を獲得することに繋がると考えられる。

そこで本研究では、異なる打点高条件における左右の上肢関節のキネティクスの分析をティー打撃条件下にて行うことにより、打点高の違いに対応する際の左右上肢の役割について明らかにすることを目的とした。具体的には、センサー・バットにより計測した左右各手のキネティクスの変量を用いて、逆動力学演算により左右上肢の関節トルク、関節トルクパワーおよび関節の力学的仕事を算出し、これらの各キネティクスの変量を打点高条件間において比較することにより、左右各上肢における役割の違いを明らかにしている。

2. 方 法

2.1 被験者およびデータ収集

大学一部リーグに所属する硬式野球部の野手23名 (年齢: 19.8 ± 1.3 歳, 身長: 1.74 ± 0.04 m, 体重: 74.1 ± 6.2 kg, 競技歴: 12.0 ± 2.1 年, 右打11名, 左打12名) を被験者とした。

実験試技では、被験者に3種類のボール高さ (高め, 真中, 低め) に設定されたティー上のボールをセンター方向に打撃するように指示した。そ

Fig. 1 Schematic illustration of the ball hitting-point heights (High, Middle, and Low).

Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup.

の際、ボール高さについては、公認野球規則 (日本プロフェッショナル野球組織, 2009) に基づき、阿江ほか (2013) と同じ設定により各打点高を設定した (Fig. 1)。実験に際して、各被験者には予め実験の目的および試技内容の説明を行い、協力への同意を得てから実験を行った。なお、本研究は筑波大学研究倫理委員会の承認を得ている。

試技の計測は、被験者の身体47点、およびバット6点の計53点に反射マーカを貼付し、光学式3次元自動動作分析装置 (VICON-MX, Vicon Motion Systems 社製, カメラ12台, 250 Hz, 以降, VICON と表記) を用いて、各マーカ

3次元座標を計測した (Fig. 2).

左右上肢の閉ループ問題を解決してキネティクスの変量を検出するために、グリップハンドル部にひずみゲージを集約したセンサー・バット (小池, 2010) を用いた. そして、サンプリング周波数1000 Hzにて計測した試技中のひずみ信号から、力およびモーメントのつり合い式により、左右各手の掌中心におけるバット作用力およびバット作用モーメントをそれぞれ算出した. なお、データ収集の方法については、阿江ほか (2013) と同一とした. 本研究では、バット・ヘッド側をパレル側、グリップエンド側をノブ側と表記する.

2.2 データ処理

本研究では、阿江ほか (2013) の方法と同様に、センター方向へ打撃され、被験者の5段階評価による内省点が3以上となる、最も点数の高かった1試技を成功試技として分析した. VI-CONにより取得した身体およびバットの各代表点の3次元座標については、Wells and Winter (1980) の方法を用いて決定された最適遮断周波数 (7.5—15 Hz) を有する位相ずれのない Butterworth digital filter を用いて平滑化処理を行った. その後、3次のスプライン関数を用いて1000 Hzのデータに内挿補間することによって、センサー・バットのサンプリング周波数と同じサンプリング間隔のデータとした.

2.3 算出項目および算出方法

2.3.1 上肢の関節座標系および関節運動軸の定義

本研究では、左右の各上肢をそれぞれ手、前腕および上腕からなる剛体リンクモデルとしてモデル化した. そして、3次元動作を評価するために、上肢各関節に機能解剖学的関節軸に対応する関節座標系を設定した (Fig. 3). また、関節角速度については、各関節座標系から関節角変位を算出した後、この角変位をそれぞれ数値微分することにより算出した. ここで本研究における関節角変位に関して、関節角変位の軸と角速度の軸を一致させるために、田子ほか (2006a, 2006b)

および川村ほか (2008) の関節角変位とは異なる算出法であるオイラー角に対応した関節角変位を用いた (Wu et al., 2005; 内藤・丸山, 2006).

なお、本研究では左右の上肢ともに肩関節は3自由度 (屈曲伸展, 内外転, 内外旋), 肘関節は2自由度 (屈曲伸展, 回内外), および手関節は2自由度 (掌背屈, 橈尺屈) とする. 左上肢の機能解剖学的関節軸および関節座標系については、右上肢と同様の手順を用いて左手座標系に対して設定した. 肘関節の内外反軸および手関節の回内外軸については、機能解剖学的な拘束により、その軸まわりの関節角速度は生じないものとした.

(1) 上肢関節座標系

① 肩関節座標系

肩関節座標系の設定に際して、まず上腕座標系 R_{ut} について、左肩関節中心 (shLC) から右肩関節中心 (shRC) へと向かう単位ベクトルを x_{ut} 、左右肋骨下端の midpoint (ribC) から、左右肩関節の midpoint (shC) へと向かうベクトルを s_{ut} とし、 s_{ut} と x_{ut} との外積より得た単位ベクトルを y_{ut} とし、 x_{ut} と y_{ut} との外積からなる単位ベクトル z_{ut} を求めた (Fig. 3(a)-1).

肩関節の屈曲伸展座標系 R_{sFE} について、上腕座標系 R_{ut} の x_{ut} と同一方向の単位ベクトルを x_{sFE} 、右肘関節中心 (elbRC) から右肩関節中心へと向かうベクトルを s_{sFE} とし、 s_{sFE} と x_{sFE} との外積より得た単位ベクトルを y_{sFE} とし、 x_{sFE} と y_{sFE} との外積からなる単位ベクトル z_{sFE} を求めた (Fig. 3(a)-1). 内外転座標系 R_{sAA} について、屈曲伸展座標系 R_{sFE} の y_{sFE} 軸と同一方向の単位ベクトルを y_{sAA} 、上述の s_{sFE} と同一方向の単位ベクトルを z_{sAA} とし、 y_{sAA} と z_{sAA} との外積からなる単位ベクトル x_{sAA} を求めた (Fig. 3(a)-2). 内外旋座標系 R_{sIER} について、内外転座標系 R_{sAA} の z_{sAA} と同一方向の単位ベクトルを z_{sIER} 、右肘の内側から外側へと向かうベクトルを s_{sIER} とし、 z_{sIER} と s_{sIER} との外積より得た単位ベクトルを y_{sIER} とし、 y_{sIER} と z_{sIER} との外積からなる単位ベクトル x_{sIER} を求めた (Fig. 3(a)-3).

Fig. 3 Definition of coordinate systems at the upper trunk and the upper limb joints ((a) shoulder, (b) elbow, and (c) wrist).

② 肘関節座標系

肘関節の屈曲伸展座標系 R_{eFE} について、肩関節の内外旋座標系 R_{sIER} の x_{eIER} と同一方向の単位ベクトルを x_{eFE} 、右手関節中心 (wrRC) から右肘関節中心へと向かうベクトルを s_{eFE} とし、 s_{eFE} と x_{eFE} との外積より得た単位ベクトルを y_{eFE} とし、 x_{eFE} と y_{eFE} との外積からなる単位ベクトル z_{eFE} を求めた (Fig. 3(b)-1). 内外反座標系 R_{eVV} について、屈曲伸展座標系 R_{eFE} の y_{eFE} と同一方向の単位ベクトルを y_{eVV} 、上述の s_{eFE} と同一方向の単位ベクトルを z_{eVV} とし、 y_{eVV} と z_{eVV} との外積からなる単位ベクトル x_{eVV}

を求めた (Fig. 3(b)-2). 回内外座標系 R_{ePS} について、内外反座標系 R_{eVV} の z_{eVV} と同一方向の単位ベクトルを z_{ePS} 、右手首の内側から外側へと向かうベクトルを s_{ePS} とし、 z_{ePS} と s_{ePS} との外積より得た単位ベクトルを y_{ePS} とし、 y_{ePS} と z_{ePS} との外積からなる単位ベクトル x_{ePS} を求めた (Fig. 3(b)-3).

③ 手関節座標系

手関節の掌背屈座標系 R_{wPDF} について、肘関節の回内外座標系 R_{ePS} の x_{ePS} と同一方向の単位ベクトルを x_{wPDF} 、右手先 (handR) から右手関節中心へと向かうベクトルを s_{wPDF} とし、 s_{wPDF}

と $\mathbf{x}_{wPDF}$ との外積より得た単位ベクトルを $\mathbf{y}_{wPDF}$ として, $\mathbf{x}_{wPDF}$ と $\mathbf{y}_{wPDF}$ との外積からなる単位ベクトル $\mathbf{z}_{wPDF}$ を求めた (Fig. 3(c)-1). 橈尺屈座標系 $\mathbf{R}_{wRU}$ について, 掌背屈座標系 $\mathbf{R}_{wPDF}$ の $\mathbf{y}_{wPDF}$ と同一方向の単位ベクトルを $\mathbf{y}_{wRU}$, 上述の $\mathbf{s}_{wPDF}$ と同一方向の単位ベクトルを $\mathbf{z}_{wRU}$ として, $\mathbf{y}_{wRU}$ と $\mathbf{z}_{wRU}$ との外積からなる単位ベクトル $\mathbf{x}_{wRU}$ を求めた (Fig. 3(c)-2). 回内外座標系 $\mathbf{R}_{wPS}$ について, 橈尺屈座標系 $\mathbf{R}_{wRU}$ の $\mathbf{z}_{wRU}$ と同一方向の単位ベクトルを $\mathbf{z}_{wPS}$, 上述の $\mathbf{s}_{ePS}$ と同一方向の単位ベクトルを $\mathbf{s}_{wPS}$ とし, $\mathbf{z}_{wPS}$ と $\mathbf{s}_{wPS}$ との外積より得た単位ベクトルを $\mathbf{y}_{wPS}$ として, $\mathbf{y}_{wPS}$ と $\mathbf{z}_{wPS}$ との外積からなる単位ベクトル $\mathbf{x}_{wPS}$ を求めた (Fig. 3(c)-3).

(2) 上肢関節運動軸

肩関節軸について, 1) 肩関節の屈曲伸展座標系 $\mathbf{R}_{sFE}$ の $\mathbf{x}_{sFE}$ 軸を屈曲伸展軸, 2) 内外転座標系 $\mathbf{R}_{sAA}$ の $\mathbf{y}_{sAA}$ 軸を内外転軸, そして, 3) 内外旋座標系 $\mathbf{R}_{sIER}$ の $\mathbf{z}_{sIER}$ 軸を内外旋軸とした. 肩関節角変位について, 1) 上腕座標系 $\mathbf{R}_{ut}$ に対する $\mathbf{R}_{sFE}$ の $\mathbf{x}_{sFE}$ 軸まわりの回転を屈曲伸展角変位, 2) 屈曲伸展座標系 $\mathbf{R}_{sFE}$ に対する $\mathbf{R}_{sAA}$ の $\mathbf{y}_{sAA}$ 軸まわりの回転を内外転角変位, そして, 3) 内外転座標系 $\mathbf{R}_{sAA}$ に対する $\mathbf{R}_{sIER}$ の $\mathbf{z}_{sIER}$ 軸まわりの回転を内外旋角変位とした.

肘関節軸について, 1) 肘関節の屈曲伸展座標系 $\mathbf{R}_{eFE}$ の $\mathbf{x}_{eFE}$ 軸を屈曲伸展軸, そして, 2) 回内外座標系 $\mathbf{R}_{ePS}$ の $\mathbf{z}_{ePS}$ 軸を回内外軸とした. 肘関節角変位について, 1) 肩関節の内外旋座標系 $\mathbf{R}_{sIER}$ に対する $\mathbf{R}_{eFE}$ の $\mathbf{x}_{eFE}$ 軸まわりの回転を屈曲伸展角変位, 2) 内外反座標系 $\mathbf{R}_{eVV}$ に対する $\mathbf{R}_{ePS}$ の $\mathbf{z}_{ePS}$ まわりの回転を回内外角変位とした.

手関節軸について, 1) 手関節の掌背屈座標系 $\mathbf{R}_{wPDF}$ の $\mathbf{x}_{wPDF}$ 軸を掌背屈軸, そして, 2) 橈尺屈座標系 $\mathbf{R}_{wRU}$ の $\mathbf{y}_{wRU}$ 軸を橈尺屈軸とした. 手関節角変位について, 1) 肘関節の回内外座標系 $\mathbf{R}_{ePS}$ に対する $\mathbf{R}_{wPDF}$ の $\mathbf{x}_{wPDF}$ まわりの回転を掌背屈角変位, 2) 掌背屈座標系 $\mathbf{R}_{wPDF}$ に対する $\mathbf{R}_{wRU}$ の $\mathbf{y}_{wRU}$ まわりの回転を橈尺屈角変位とした.

2.3.2 関節トルク

本研究では, 左右各上肢の各節を構成する剛体リンクとしてモデル化されたセグメント k, i (k = バレル側, ノブ側; i = 手, 前腕, 上腕) 単体に対する並進および回転の運動方程式を用いて算出した. すなわち, セグメント k, i の遠位端に作用する力およびモーメントを $\mathbf{f}_{k,i}$ および $\mathbf{n}_{k,i}$ とすると, セグメント k, i の近位端に作用する力 $\mathbf{f}_{k,i+1}$ およびモーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ は, セグメントの並進の運動方程式および回転の運動方程式から, それぞれ

$$\mathbf{f}_{k,i+1} = -m_{k,i}\ddot{\mathbf{x}}_{k,i} + m_{k,i}\mathbf{g} + \mathbf{f}_{k,i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{k,i+1} = & \mathbf{r}_{k,i,\text{cgP}} \times \mathbf{f}_{k,i} - \mathbf{r}_{k,i,\text{cgD}} \times \mathbf{f}_{k,i+1} - \hat{\mathbf{I}}_{k,i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,i} \\ & - \boldsymbol{\omega}_{k,i} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,i}\boldsymbol{\omega}_{k,i}) + \mathbf{n}_{k,i} \end{aligned} \quad (2)$$

と算出することができる. ここで, 式(1)および(2)における $m_{k,i}$ はセグメント k, i の質量, $\mathbf{x}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の重心位置ベクトル, $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル, $\hat{\mathbf{I}}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の慣性テンソル, $\boldsymbol{\omega}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の角速度ベクトルをそれぞれ示している. また, $\mathbf{r}_{k,i,\text{cgP}}$ および $\mathbf{r}_{k,i,\text{cgD}}$ は, セグメント重心から近位端および遠位端にそれぞれ向かう位置ベクトルを示している. なお, 右辺4項 ($\boldsymbol{\omega}_{k,i} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,i}\boldsymbol{\omega}_{k,i})$) はジャイロモーメントを示す. また, 各セグメントの部分質量, 重心位置および慣性モーメントなどの身体部分慣性パラメータについては, 阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて被験者毎に推定した. そして, この逆動力学演算によって算出された作用モーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ を, 上述した該当する関節軸の軸方向単位ベクトルに投影することにより各関節の機能解剖学的関節トルクを求めた.

2.3.3 関節トルクパワーおよび力学的仕事

関節トルクパワーについては, 関節トルクと関節角速度との積として求め, その後, この関節トルクパワーを分析局面であるダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面(阿江ほか, 2013)の各区分別, ならびに符号の正負別に時間積分することによって各局面における関節トルクによる正負の力学的仕事(以降, 仕事と表記)

を算出した。

2.4 分析範囲および局面の定義

動作の分析については、スウィング開始時点からボールインパクト（以降、インパクトと表記）までのフォワード・スウィング期をその対象範囲とした。スウィング開始時点からバット・ヘッド速度の鉛直成分が最小となる時点（ $V_{\text{bat-head}_z}$ （-）Max）までをダウン・スウィング局面、この時点からインパクトまでをレベル・スウィング局面とそれぞれ定義して局面分けを行った。ここでスウィング開始時点は、バットのヘッド部スピードとグリップエンド部スピードの和が3 m/sを超えた時点とした。なお、バット・ヘッド速度鉛直成分の最小（負値）は、バット・ヘッド速度の鉛直下方成分の最大を意味する。インパクトに関しては、本研究のサンプリング周波数では正確なインパクト時点を検出することは困難であることから、平滑化処理を行っていないバット先端部の反射マーカから算出したバット・ヘッドスピードがバットとボールの接触により急激に減少する1コマ前をインパクトとした。

2.5 データの規格化および統計処理

上述した各算出項目については、左打者の値においても全て右打者の値になるように変換してから全被験者の平均値を算出している。時系列データについては、スウィング開始からインパクトまでの時間を100%として、3次スプライン関数を用いた内挿補間により規格化した。また、ダウン・スウィング局面からレベル・スウィング局面への切り替わり時間については、各打点高における切り替わり時間の平均値がおおよそ80%規格化時間であったことから、時系列データのレベル・スウィング局面（80—100%）を灰色によって示すこととした。

統計処理では、各算出項目（関節角速度、関節トルク、関節トルクパワー、仕事）における打点高（高め：High，真中：Mid，低め：Low）間の有意差の要因について、算出項目に対応のある一元配置の分散分析を適用して、有意水準5%の

検定を行った。なお、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。そして、有意となった項目については多重比較検定（Bonferroni法）を行った。

3. 結 果

3.1 左右の肩関節トルク、角速度およびトルクパワーについて

フォワード・スウィング期における肩関節の屈曲伸展、内外転、および内外旋の各軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、バレル側の各値をFig. 4に、ノブ側の各値をFig. 5にそれぞれ示す。なお、各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正，屈曲：負）の値を，中列が内外転軸（外転：正，内転：負）の値を，右列が内外旋軸（外旋：正，内旋：負）の値をそれぞれ示しており，上段(a)，(d)，(g)にトルク，中段(b)，(e)，(h)に角速度，そして下段(c)，(f)，(i)にトルクパワーの各値を示している（高：点線，中：黒線，低：灰色線）。また，打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高一中：△，高一低：*，中—低：×）。

Fig. 4 から，バレル側の肩関節の屈曲伸展軸について，関節トルク(a)では，0%から50%付近にかけて打点が低い程，伸展トルクが有意に大きかった。なお，50%以降から90%付近にかけて屈曲トルクがみられ，高めと低めの間に有意差な差がみられた。関節角速度(b)では，20%から60%付近にかけて打点が低い程，伸展角速度が，そして70%付近以降では打点が低い程，屈曲角速度がそれぞれ有意に大きかった。関節トルクパワー(c)では，主に10%付近から50%付近において打点が低い程，正のトルクパワーが有意に大きかった。バレル側の肩関節の内外転軸について，関節トルク(d)では，内転のみのトルクがみられ，特に60%付近において打点高間による有意差が大きかった。関節角速度(e)では，30%から70%付近にかけて打点が低い程，内転角速度が有意に大きく，80%付近からは打点が低い程，外転角速度が有意に大きかった。関節トルク

Fig. 4 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the flexion/extension, adduction/abduction, and internal/external rotation axes of the barrel-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

パワー(f)では、20%から50%付近にかけて打点が高い程、正のトルクパワーが大きくなり、40%付近においてピーク値がみられた。また、80%付近以降では打点が高い程、負のトルクパワーが有意に大きかった。バレル側の肩関節の内旋軸について、関節トルク(g)では、スウィング開始から打点が高い程、外旋トルクが有意に大きく、その後20%付近以降からインパクトにかけて打点が高い程、内旋トルクが大きく、60%から90%付近にかけて、主に高めと真中との間、および高めと低めとの間に有意な差がみられた。関節角速度(h)では、20%から40%付近にかけて打点が高い程、外旋角速度が有意に大きく、40%以降から90%付近にかけては内旋角速度がみられた。その後、インパクト近傍では、高めおよび真中の打点高において打点が高い程、外旋角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(i)では、50%から90%付近にかけて正のトルクパワーがみられた後、インパクト近傍では打点が高い

程、負のトルクパワーが有意に大きかった。

Fig. 5 から、ノブ側の肩関節の屈曲伸展軸について、関節トルク(a)では、伸展のみのトルクがみられ、スウィング開始から35%付近にかけて打点が高い程、70%付近から100%にかけて打点が高い程、伸展トルクが有意に大きかった。関節角速度(b)では、15%付近から50%にかけて、および85%付近以降において、打点が高い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(c)では、20%から50%付近にかけて打点が高い程、正のトルクパワーが大きかった。ノブ側の肩関節の内外軸について、関節トルク(d)では、バレル側の肩関節の内外軸とは反対に、外転のみのトルクがみられ、70%から90%付近にかけては打点が高い程、そして、インパクト近傍では打点が高い程、それぞれ外転トルクが有意に大きかった。関節角速度(e)では、スウィング開始から30%付近にかけて打点が高い程、内転角速度が、65%から90%付近にかけて打点が高い程、

Fig. 5 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the flexion/extension, abduction/adduction, and internal/external rotation axes of the knob-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

外転角速度が、90%付近以降においては打点が低い程、内転角速度がそれぞれ有意に大きかった。関節トルクパワー(f)では、40%から90%付近にかけて正のトルクパワーが大きく、その後インパクト近傍においては打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きかった。ノブ側の肩関節の内外旋軸について、関節トルク(g)では、外旋のみのトルクがみられ、40%付近においてピーク値がみられた後、75%付近において外旋トルクが最小値となり、その後、インパクトにかけて再び外旋トルクが増加していた。関節角速度(h)では、ほぼ内旋角速度のみがみられ、35%以降から80%付近にかけて打点が低い程、内旋角速度が大きく、35%から70%付近にかけて主に高めと低めとの間に有意な差がみられた。その後、インパクトにかけて、特に低めの打点高において内旋角速度は減少していた。関節トルクパワー(i)では、インパクト近傍では、高めおよび真中の打点高において負のトルクパワーが増加していた。

3.2 左右の肘関節トルク、角速度およびトルクパワーについて

フォワード・スウィング期における肘関節の屈曲伸展、および回内外の各軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、バレル側の各値を Fig. 6 に、ノブ側の各値を Fig. 7 にそれぞれ示す。各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正、屈曲：負）を、右列が回内外軸（回外：正、回内：負）の値を示しており、図内の各線および各印の仕様は、Fig. 4 および Fig. 5 と同様である。

Fig. 6 から、バレル側の肘関節の屈曲伸展軸について、関節トルク(a)では、スウィング開始から、主に高めの打点高において屈曲トルクが、低めの打点高においては伸展トルクがみられ、打点高間に有意差もみられた。その後、60%付近からは各打点高ともに伸展トルクがみられ、インパクト近傍では、真中および低めの打点高において屈曲トルクがみられた。関節角速度(b)では、主

(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Fig. 6 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the flexion/extension and pronation/supination axes of the barrel-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

に40%から100%にかけてその差は小さいものの打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(c)では、50%から80%付近にかけて打点が低い程、正のトルクパワーが大きくなり、インパクト近傍では、高めの打点高において正のトルクパワーを、真中および低めの打点高において負のトルクパワーをそれぞれ示した。バレル側の肘関節の回内外軸について、関節トルク(d)では、60%付近以降において打点が低い程、回内トルクが大きかった。関節角速度(e)では、スウィング開始から回内角速度がみられた後、55%付近以降から打点が低い程、回外角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(f)では、70%から85%付近にかけて打点が低い程、負のトルクパワーが大きかった。

Fig. 7 から、ノブ側の肘関節の屈曲伸展軸につ

いて、関節トルク(a)では、打点高によらず、伸展のみのトルクがみられ、90%付近に出現するピーク値の発揮タイミングは打点が低い程早く、インパクト近傍の伸展トルクは打点が高い程、大きくなる傾向にあった。関節角速度(b)では、フォワード・スウィング期の大半で打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(c)では、関節角速度の波形と同様にフォワード・スウィング期の大半で打点が低い程、正のトルクパワーが大きく、10%から60%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。ノブ側の肘関節の回内外軸について、関節トルク(d)では、20%から60%付近にかけて打点が高い程、回外トルクが大きく、それ以降の60%から90%付近にかけては打点が低い程、回内トルクが有意に大

(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Fig. 7 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the flexion/extension and pronation/supination axes of the knob-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

きかった。関節角速度(e)では、スウィング開始から60%付近にかけて回内角速度がみられた後、インパクトに向けて回外角速度が増大していたが、打点高間に有意な差はみられなかった。関節トルクパワー(f)では、主にインパクトに近づくにつれて負のトルクパワーが増加していた。

3.3 左右の手関節トルク、角速度およびトルクパワーについて

フォワード・スウィング期における手関節の掌背屈、および橈尺屈の各軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、バレル側の各値をFig. 8に、ノブ側の各値をFig. 9にそれぞれ示す。各図の左列が掌背屈軸(背屈:正, 掌屈:負)を、右列が橈尺屈軸(橈屈:正, 尺屈:負)の値を示しており、図内の各

線および各印の仕様は、Fig. 4およびFig. 5と同様である。

Fig. 8から、バレル側の手関節の掌背屈軸について、関節トルク(a)では、スウィング開始から40%付近にかけて打点が高い程、背屈トルクが有意に大きく、80%からインパクトにかけては打点が高い程、掌屈トルクが有意に大きかった。関節角速度(b)では、20%から70%付近にかけて背屈角速度がみられ、それ以降においては打点が高い程、掌屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(c)では、50%から70%付近にかけて負のトルクパワーがみられた後、90%付近まで正のトルクパワーが増大していた。バレル側の手関節の橈尺屈軸について、関節トルク(d)では、20%付近からは低めの打点高において、30%付近からは高めおよび真中の打点高において、それ

(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Fig. 8 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the barrel-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ぞれ尺屈トルクがみられ、70%付近からは特に高めの打点高において尺屈トルクが有意に大きかった。関節角速度(e)では、80%付近からインパクトにかけて打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(f)では、70%近傍において打点が高い程、負のトルクパワーが有意に大きく、その後、80%付近以降からは正のトルクパワーが増大していた。

Fig. 9 から、ノブ側の手関節の掌背屈軸について、関節トルク(a)では、掌屈のみのトルクがみられ、特にインパクト近傍においてその値は増大していたが、打点高間に有意な差はみられなかった。関節角速度(b)では、主に掌屈角速度がみられ、80%付近においてピーク値を迎え、その後、インパクト直前までその値は減少しており、打点高間に有意な差がみられた。関節トルクパ

ワー(c)では、50%から80%付近にかけて正のトルクパワーが増大した後、インパクトに向けて減少していた。ノブ側の手関節の橈尺屈軸について、関節トルク(d)では、尺屈のみのトルクがみられ、インパクト近傍では打点が低い程、尺屈トルクが有意に大きかった。関節角速度(e)では、60%付近から尺屈角速度が生じ、インパクト近傍においては打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー(f)では、30%から60%付近にかけて打点が高い程、負のトルクパワーが大きく、それ以降は正のトルクパワーとなり、インパクト近傍では、特に低めの打点高において正のトルクパワーの顕著な減少がみられた。

3.4 左右の上肢関節トルクによる仕事

Fig. 10に、左右上肢の各関節軸トルクによる

(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Fig. 9 Curves of joint torque, joint angular velocity, and joint torque power of the palmar/dorsal flexion and radial flexion/ulnar flexion axes of the knob-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

仕事を局面毎に正負（正： W_p ，負： W_n ）に分けて示す。各仕事は、左右の上肢毎に、肩関節（屈曲伸展軸： sFE ，内外転軸： sAA ，内外旋軸： $sIER$ ），肘関節（屈曲伸展軸： eFE ，回内外軸： ePS ），そして手関節（掌背屈軸： $wPDF$ ，橈尺屈軸： wRU ）における各軸の値をそれぞれ示している。なお、各仕事の打点高間における統計的な有意差を Table 1 に示す。

バレル側上肢の肩関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事が有意に大きく（ sFE : $H < M < L$, $p < 0.05$ ），また、打点が高い程、屈曲伸展トルクによる負仕事が有意に大きかった（ sFE : $H > L$, $M > L$, $p < 0.05$ ）。レベル・スウィング局面では打点が低い程、内外転トルクによる負仕事が有意に大きく（ sAA : $H < M < L$, $p < 0.05$ ），内外旋ト

ルクによる仕事においては正および負仕事のみられ、正仕事は打点が低い程、有意に大きく（ $sIER$: $H < L$, $p < 0.05$ ），負仕事は打点が高い程、有意に大きかった（ $sIER$: $H > L$, $p < 0.05$ ）。肘関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きかった（ eFE : $H < L$, $M < L$, $p < 0.05$ ）。また、レベル・スウィング局面では打点が高い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きかった（ eFE : $H > M$, $H > L$, $p < 0.05$ ）。一方、回内外軸トルクによる負仕事もみられたものの、打点高間による有意な差はみられなかった。手関節について、レベル・スウィング局面では打点が低い程、掌背屈トルクによる正仕事が大きかった（ $wPDF$: $H < M$, $H < L$, $p < 0.05$ ）。

ノブ側上肢の肩関節について、ダウン・スウィ

ング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事が有意に大きく (sFE: $H < L$, $p < 0.05$), また、打点が低い程、内外転トルクによる負仕事が有意に大きかった (sAA: $H < L$, $p < 0.05$). レベル・スウィング局面では打点が高い程、内外転トルクによる正仕事が有意に大きく

(sAA: $H > L$, $p < 0.05$), また、打点が低い程、内外転トルクによる負仕事が有意に大きかった (sAA: $H < L$, $M < L$, $p < 0.05$). 肘関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事が有意に大きかった (eFE: $H < L$, $p < 0.05$). 手関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、掌背屈トルクによる正仕事が有意に大きく (wPDF: $H < L$, $p < 0.05$), また、打点が高い程、橈尺屈トルクによる負仕事が有意に大きかった (wRU: $H > M$, $H > L$, $p < 0.05$). レベル・スウィング局面では打点が高い程、掌背屈トルクによる正仕事が有意に大きかった (wPDF: $H > L$, $p < 0.05$).

Fig. 10 The mechanical works done by the shoulder, elbow, and wrist joint torques.

4. 考 察

野球の打撃動作為3次元的、且つ複雑な動作であること、そして本研究の分析対象が左右の各上肢であるために分析自由度が多数となることから、ここでは上肢をバレル側およびノブ側に、そしてフォワード・スウィングをダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面に分けて、

Table 1 Significant differences of the mechanical works among hitting-point height conditions

		Down swing phase				Level swing phase			
		Barrel-side		Knob-side		Barrel-side		Knob-side	
		W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n
Shoulder	sFE	$H < M < L$	$H > L$, $M > L$	$H < L$	—	—	—	—	—
	sAA	—	$H < L$	—	$H < L$	$H > M$, $H > L$	$H < M < L$	$H > L$	$H < L$, $M < L$
	sIER	—	$H < L$	$H > L$	$H < L$	$H < L$	$H > L$	—	$H > L$
Elbow	eFE	$H < L$, $M < L$	—	$H < L$	$H > L$, $M > L$	$H > M$, $H > L$	$H > L$	—	—
	ePS	—	$H < L$, $M < L$	—	—	—	—	—	—
Wrist	wPDF	—	—	$H < L$	—	$H < M$, $H < L$	—	$H > L$	—
	wRU	—	—	—	$H > M$, $H > L$	—	$H > L$	—	—

Significant difference ($p < 0.05$)

H: High
M: Middle
L: Low
 W_p : Positive work
 W_n : Negative work
sFE: Shoulder flexion/extension
sAA: Shoulder adduction/abduction
sIER: Shoulder internal/external rotation
eFE: Elbow flexion/extension
ePS: Elbow pronation/supination
wPDF: Wrist palmar/dorsal flexion
wRU: Wrist radial/ulnar flexion

打点高に対応する際の各関節の役割についての考察を行う。なお、左右の肘関節の回内外軸では、トルク発揮が他の軸と比較して顕著に小さいことから、および打点高間に顕著な差がみられなかったことから、打点高への対応に大きくは寄与しないと考えられるため、肘関節については屈曲伸展軸のみについて考察を行うこととする。

4.1 打点高の違いに対応するためのバレル側上肢の役割

4.1.1 ダウン・スウィング局面について

阿江ほか (2013) は、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、左右各手によるバット長軸方向作用力、およびその鉛直成分による仕事とともに大きくなること、そして、同局面前半においては、バット・ヘッドがノブに対して上方に位置することを報告している。したがって、主にダウン・スウィング局面前半において打点が低い程、バットが起きていることから、肩関節の伸展トルク、正のトルクパワーならびに正仕事を増大

させることは (Fig. 4(a), (c), Fig. 10), バット重心および上肢を鉛直下方へと加速させることに寄与すると考えられる。また、肩関節の内外転角変位をみてみると、打点が低い程、外転角が有意に大きく、その値はスウィング開始時点から時間の経過により減少し、80%付近においてはいずれの打点高においても10度程度となっていた (Fig. 11(a))。このことは、バッターが肩関節の外転角を小さくする動作、いわゆる脇を閉める動作を行っていることを意味している (川村ほか, 2008)。すなわち主に打点が低い程、肩関節の内転トルク、正のトルクパワー、および正仕事を増大させることは (Fig. 4(d), (f), Fig. 10), 指導現場ではインサイド・アウトと表現されるスウィングを行うための脇を閉める動作を行うことに寄与すると考えられる。

加えて、スウィング開始から70%にかけて肘関節の屈曲伸展トルクに打点高間による顕著な差がみられたものの、角速度およびトルクパワーは小さく (Fig. 6(a), (b), (c)), 肘関節の屈曲伸展

Fig. 11 Curves of joint angle of the adduction/abduction axis of the individual shoulder joint and the flexion/extension axis of the individual elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

角度にも打点高間に顕著な差はみられなかった (Fig. 11(b)). すなわち、肘関節の屈曲伸展軸では、打点高の違いに応じて発揮トルクの大きさを变化させることによって、打点高によらず、関節角度の変化を小さくし、伸展角度を維持しようとする働きがあると考えられる。ここで肘関節の伸展角度を維持しようとすることは、身体の近傍にバットを留めてバット操作を行い易くして、肩関節の屈曲伸展トルクがバットを鉛直下方へと加速させることに繋がると考えられる。そして、50% 付近以降においては、特に低めの打点高の場合には、肘関節の伸展トルクによる正のトルクパワーの増大するタイミングが他の打点高の場合よりも早かった (Fig. 6(c)). 川村ほか (2000) は、ハンマー投げのように体幹を軸とする回転運動が支配的な場合であれば、肘関節は常に伸展位を保つことになるのに対して、野球の打撃動作ではバットを押し出すためにスウィング中に両肘関節を伸展させる必要があると報告している。さらに田子ほか (2006b) は、打点が低い程、バレル側の肘関節の伸展角度を大きくして、上肢をボール打撃方向 (センター方向) へと伸ばしながらインパクトを迎えていたと報告しており、本研究においても肘関節の屈曲伸展角変位は同様な傾向を示した (Fig. 11(b)). これらのことから、バレル側の肘関節では、60% 以降において伸展トルク、そして正のトルクパワーを増大させて、各打点位置へとバットを変位させる働きがあり、特に低めの打点高の場合には、その働きが他の打点高よりも顕著であったといえる。

4.1.2 レベル・スウィング局面について

インパクトに近づくにつれて打点が低い程、肩関節の内転トルクによる負のトルクパワーが増大していた (Fig. 4(d), (f)). 阿江ほか (2013) は、ノブ側手ほどではないものの、打点が低い程、バレル側手のバット長軸力は大きくなると報告している。なお、このバット長軸力は、バットのグリップエンドを中心とした回転運動を行うことによって発生する遠心力に抗する力である。このため、野球の打撃動作における肩関節の内外転動作は、主にバット重心の水平変位の獲得に寄与する

こと、そして、本研究において打点が低い程、肩関節の内転トルクによる負のトルクパワーが大きかったことを考慮すると、肩関節の内転トルクは打点が低い程、大きくなるバットの遠心力に抗するために、上腕の外転を抑制させつつ、バット長軸力を生成していると考えられる。また、肩関節の内外旋軸については、主に60% から90% 付近にかけて打点が低い程、内旋トルクが有意に大きく、特にインパクト近傍において、高めおよび真中の打点高における負のトルクパワーが低めの打点高よりも有意に大きかった (Fig. 4(g), (i)). この内外旋動作は、肩関節の内外転動作と同様に上腕を体幹に近づけて脇を閉めるような動作となることから、バットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる。したがって、バレル側の肩関節の内旋トルクは、特に高めおよび真中の打点高において、肩関節の内外転トルクの働きと同様にバット長軸力の生成に寄与すると推察される。

上述したように、ダウン・スウィング局面後半から、バットを押し出すために肘関節の伸展トルク、および正のトルクパワーが増大し、その後、インパクト近傍では真中および低めの打点高において負のトルクパワーがみられたことから、打点が低い程、肘関節の過伸展を抑制するような働きもあることが示唆される。加えて、川村ほか (2001, 2008) は、バットの加速に対して、手関節では主に橈尺屈動作が寄与すると報告している。これに対して、特にインパクト近傍において手関節の掌屈トルクが増大し、打点が低い程、掌屈角速度が有意に大きくなり、正のトルクパワーも増大していた (Fig. 8(a), (b), (c)). ここで、阿江ほか (2013) は、左右各手によるバット作用力およびバット作用モーメントのうち、バットの鉛直変位の獲得にバット長軸力の鉛直成分、偶力のバット起し倒し軸まわり成分、そして作用モーメントの起し倒し軸まわり成分の3成分が寄与すると報告している。そこで、打点高への対応に寄与する関節トルクの成分を抽出するために、これら3成分を左右各手部セグメントの外力および外モーメントとして、力とモーメントの静的な釣り合い式 (Zatsiorsky, 2002 ; 広瀬,

Fig. 12 Curves of joint torques caused statically by three components which mainly contribute to generate vertical motion of bat head. The torques are about the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the individual wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

2005) から、これらの3成分に起因する関節トルクを算出した。その結果、主に60%付近以降において手関節の掌背屈トルクには各打点高間に有意な差がみられたものの、逆動力学演算によるトルクと比べてその値は小さかった (Fig. 12 (a))。すなわち、逆動力学演算による掌屈トルクの生成要因が、主にバットの水平変位の獲得に寄与する成分であることを示す。これらのことから、手関節の掌屈トルクは、主にバットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる。手関節の橈尺屈軸についても、80%付近以降において尺屈トルクがみられ、打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きく、インパクトに近づくにつれて打点が低い程、正のトルクパワーが急激に大きくなる傾向がみられた (Fig. 8(d), (e), (f))。3成分に起因する手関節の橈尺屈トルクは、主に50%付近以降において打点高間に有意な差がみられたものの、その値は小さかった (Fig. 12(b))。これらのことから、手関節の橈尺屈の働きは、尺屈トル

クを発揮することにより正のトルクパワーを増大させて、打点高の調整ではなく、主にバットの水平変位の獲得、すなわちバット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。

4.2 打点高の違いに対応するためのノブ側上肢の役割

4.2.1 ダウン・スウィング局面について

スウィング開始から肩関節の伸展のみのトルクがみられ、20%から50%付近にかけて打点が低い程、伸展トルクおよび正のトルクパワーが大きくなる傾向がみられた (Fig. 5(a), (c))。これらの結果は、バレル側の肩関節の屈曲伸展軸における結果と同様な傾向となることから、ノブ側の肩関節の屈曲伸展トルクは、バット重心、そして上肢を鉛直下方へと加速させることに寄与すると考えられる。そして、バレル側手に比べて、ノブ側手によるバット長軸力の鉛直成分が打点高への対応に大きく寄与するとの報告 (阿江ほか, 2013)

がされていることから、ノブ側の肩関節の屈曲伸展トルクは、バレル側の肩関節の屈曲伸展トルクよりも打点高への対応に大きく寄与することが示唆される。

また、肘関節の伸展トルクは大きいものの、打点高の違いによる顕著な差はみられず、角速度は打点高間において差がみられたものの、その値は小さかった (Fig. 7(a), (b)). 肘関節の屈曲伸展角度では、スウィング開始からインパクトにかけて打点が低い程、伸展角が大きかった (Fig. 11(d)). これらのことから、ノブ側の肘関節の伸展角度を維持しようとすることは、バレル側の肘関節の屈曲伸展トルクの働きと同様に、肩関節の屈曲伸展トルクをバット操作に寄与させ易くすることに繋がると考えられる。そして、このように異なる打点高において、肘関節の屈曲伸展トルクの発揮の様相がほぼ同様であっても、関節角度および関節角速度に違いがあることが、関節トルクパワーの立ち上がりのタイミング、およびその値に影響を及ぼすと推察される。

4.2.2 レベル・スウィング局面について

ダウン・スウィング局面後半から打点が高い程、肩関節の伸展トルクが有意に大きかったのに対して、伸展角速度は 0 rad/s に近く、正のトルクパワーにも顕著な差はみられなかった (Fig. 5(a), (b), (c)). 川村ほか (2008) は、肩関節の角度変化が小さいことから、体幹の回転動作に比べてバットの加速に対する肩関節の角変位による貢献は小さいと報告している。その一方で、田子ほか (2006b) は、特に打点が高い場合には、インパクト近傍ではノブ側の肩関節の屈曲角度が小さくなると報告している。これらのことを考慮すると、肩関節の屈曲伸展トルクを打点高に応じて変化させることは、関節角度変化の範囲は小さいものの、その範囲内に屈曲伸展動作を抑制して、屈曲伸展角度を保つことに寄与すると考えられる。

ここで、小池ほか (2003, 2006)、および小池・阿江 (2012) は、バット・スウィング動作におけるノブ側上肢の関節トルクは、主にバットを加速させること、そして、特にインパクト付近ではバットの遠心力に抗してバットを身体近傍に

留めることに寄与すると報告している。本研究では打点が低い程、バット・ヘッドスピードの最大値は有意に大きかった (高め: 34.9 m/s , 真中: 35.8 m/s , 低め: 36.2 m/s , $H < M < L$, $p < 0.05$). 肩関節の内外転トルクについては他の関節軸トルクと比べて顕著に大きく、インパクト付近において外転トルクおよび負のトルクパワーが増大し (Fig. 5(d), (f)), 外転トルクによる正仕事は他の軸よりも大きかった (Fig. 10). また、肩関節の内転角度の変化が緩やかとなり (Fig. 11(c)), この角速度についても減少していた (Fig. 5(e)). これらのことから、先行研究の報告と同様に、肩関節の内外転トルクは、バットの遠心力に抗するバット長軸力を生成すること、およびバットを身体近傍に留めることに寄与すると考えられる。阿江ほか (2013) は、特にダウン・スウィング局面においてノブ側手は打点高への対応に大きく寄与すると報告しているのに対して、本研究では、肩関節の内外転トルク、トルクパワーおよび仕事には統計的な有意差はみられなかったものの、その値には顕著な差はみられなかった (Fig. 5(d), (f), Fig. 10, Table 1). このため、先行研究 (小池ほか, 2003, 2006; 小池・阿江, 2012) において言及されているように、他の軸よりも顕著に大きくなるノブ側の肩関節の内外転トルクは、バット・ヘッドスピードの生成に寄与する成分が支配的であることから、打点高の違いに対応するためのバット操作に寄与するトルクの差異がみられにくくなっていると推察される。

バレル側では顕著な働きがみられなかった肘関節については、80% 付近以降において、伸展角速度の減少によるトルクパワーの一時的な減少がみられた後、打点が低い程、伸展トルクによる正のトルクパワーが急激に増大していた (Fig. 7(a), (b), (c)). 先行研究では、上述した肩関節の角度変化と同様に、ノブ側肘関節の屈曲伸展角度の変化も小さいことから、バットの加速に対する貢献は小さいと報告 (川村ほか, 2008) されている。その一方で、インパクト付近におけるノブ側上肢の役割は、バット・ヘッドを加速させることであると報告 (小池ほか, 2003, 2006; 小

池・阿江, 2012) もされている. これらのことを考慮すると, 打点高の違いによらず肘関節の屈曲伸展角度の変化が小さく, また関節角度を維持することは, バットのノブ側手を支点として, バレル側の肘関節伸展トルクによってバット・ヘッドを打撃方向へと押し出し易くすることに寄与し, その後, 打点が低い程, 肘関節の屈曲伸展軸トルクパワーを増大させることは, インパクトに向けてのバット・ヘッドの加速に寄与すると推察される.

加えて, 特にインパクト近傍において, 打点高への対応に寄与する3成分に起因する手関節の掌背屈トルクは, 逆動力学演算から得た手関節の掌背屈トルクに比べて顕著に大きく, 打点高間に有意な差がみられた (Fig. 12(c)). このように3成分に起因するトルクが大きいものに対して, 逆動力学演算によるトルクが小さいことは, バットの水平変位の獲得に寄与する成分に起因するトルクが, 打点高への対応に寄与する3成分に起因するトルクを打ち消すように, 大きくなっていることを示している. したがって, 手関節の掌屈トルクは, バットの鉛直および水平変位の獲得の両方に寄与することが示唆される. これに対して, 橈尺屈トルク, トルクパワーおよび仕事には, 打点高間による顕著な差はみられなかった (Fig. 9(d), (f), Fig. 10, Table 1). また, 打点高への対応に寄与する3成分に起因する橈尺屈トルクは, 逆動力学演算による橈尺屈トルクに比べて小さかった (Fig. 12(d)). すなわち, 手関節の橈尺屈トルクは, 打点高への対応に寄与する3成分を除いた, バットの水平変位の獲得に寄与するバットのキネティクスの変量, および各セグメントの慣性力に起因するトルクであるといえる. McIntyre and Pfausch (1982) は, ライトあるいはレフト方向へと打球を打ち分ける際, ノブ側の肘関節, および手関節の動作調整がバットの姿勢を変化させると報告している. これらのことから, 手関節の橈尺屈トルクは, 主にバットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる. また, このノブ側の手関節の橈尺屈トルクは, バレル側の手関節の橈尺屈トルクに比べて, スウィング開始か

らより早いタイミングにおいて, トルクの発揮が顕著にみられた. したがって, ノブ側の手関節はスウィング開始以降の早期にバット操作に関与することも示唆される.

他方, ノブ側の手関節を含めた左右の手関節におけるトルクは, 肩および肘関節に比べて, その関節軸から各手におけるバット作用力の作用点までの距離が短く, そのモーメントアームも短くなる. このため, 特にノブ側の手関節には, 肩および肘関節のトルク発揮によって生成された力学的エネルギーをバットへと伝達する働きもあると考えられる.

4.3 局面毎の左右上肢関節の役割

ここでは, 4.1および4.2の考察に基づき, フォワード・スウィングにおける打点高に対応する際の局面毎の左右上肢関節の役割についてまとめる. まずスウィング開始から80%付近までのダウン・スウィング局面では, 特に両肩関節の屈曲伸展トルクはバットの鉛直下方への加速に大きく寄与すると考えられる. また, バレル側の肩関節の内外転トルク, および両肘関節の屈曲伸展トルクは, 関節角度の維持あるいは調整に寄与することによって, 両肩関節の屈曲伸展トルクによるバットの鉛直下方への加速を行い易くしていると考えられる.

つぎに80%付近以降からインパクトまでのレベル・スウィング局面では, いずれの関節においても, インパクトに向けて, 関節トルクの発揮および関節トルクパワーが増大する傾向がみられた. とりわけノブ側の肩関節の内外転トルクが顕著に大きくなることから, このトルクが, バレル側の肩関節の内外転および内外旋トルクとともに, バットの遠心力に抗するためのバット長軸力の生成に寄与すると考えられる. また, これらの両肩関節トルク以外にも, 両肘関節の屈曲伸展トルク, そして両手関節の掌背屈および橈尺屈トルクは, バットの水平変位の獲得, そして, バット・ヘッドスピード生成には寄与するものの, バットの鉛直変位の獲得に対しては, ダウン・スウィング局面ほど大きくは寄与しないと考えられる.

野球の打撃動作，テニスのフォアハンドストローク，およびゴルフ動作の筋活動に関する研究 (Kitzman, 1963 ; 平野, 1984, 1993 ; Jobe et al., 1989 ; Morris et al., 1989) において，スウィング開始直後では，主に体幹および肩関節まわりの筋群の活動が，インパクト直前では，体幹および肩関節まわりの筋群に加えて，主に手関節まわりの筋群の活動が顕著になると報告されている．すなわち，上肢の末端部を加速させるには身体の近位から遠位へと動作が順次行われることが有効であるといえる．したがって，スウィング開始直後では，身体の近位となる肩関節トルクによって主に打点高への対応を行い，インパクト直前では，打点高に関係なく，肘および手関節トルクによってバット・ヘッドスピードの生成を行うことが有効であると考えられる．

5. 結 論

本研究の目的は，センサー・バットを用いた，異なる打点高条件に対するティー打撃動作における左右の上肢関節のキネティクスの分析から，異なる打点高に対応するための上肢関節の役割について明らかにすることであった．本研究によって得られた結果をまとめると以下のようになる．

- ① バレル側の肩関節について，ダウン・スウィング局面前半では打点が低い程，伸展トルク，および伸展トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．同局面後半では打点が高い程，内転トルクが有意に大きかった．レベル・スウィング局面では，インパクト近傍において打点が低い程，内転トルクによる負のトルクパワー，および内旋トルクによる負のトルクパワーが有意に大きかった．
- ② ノブ側の肩関節について，ダウン・スウィング局面前半では打点が低い程，伸展トルクおよび正のトルクパワーが大きかった．レベル・スウィング局面では打点が高い程，伸展トルクが有意に大きく，特にインパクト近傍において打点が低い程，外転トルク，および外転トルクによる負のトルクパワーが有意に

大きかった．

- ③ 肘関節について，ダウン・スウィング局面では打点が低い程，主にバレル側の伸展トルク，およびノブ側の伸展トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．レベル・スウィング局面では打点が低い程，バレル側の伸展トルクによる正のトルクパワー，およびノブ側の伸展トルクによる正のトルクパワーが大きかった．
 - ④ 手関節について，特にバレル側手関節において，ダウン・スウィング局面後半では打点が低い程，掌屈トルクが有意に大きく，また打点が高い程，尺屈トルクが有意に大きかった．レベル・スウィング局面前半では打点が低い程，掌屈および尺屈トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．
 - ⑤ 関節トルクによる力学的仕事について，左右の上肢ともに肩関節の屈曲伸展軸および内外転軸，肘関節の屈曲伸展軸では，発揮される仕事は顕著に大きく，且つ打点高間に有意な差がみられた．
- 以上のことから，異なる打点高への対応として，ダウン・スウィング局面では，両肩関節の屈曲伸展トルクがバットを鉛直変位させることに大きく寄与し，バレル側の肩関節の内外転および両肘関節の屈曲伸展トルクは，関節角度を調整あるいは維持することによって，身体の近傍にバットを留めてバット操作を行い易くするとともに，左右の肩関節の屈曲伸展トルクによってバットを鉛直下方へと変位させることに寄与すると考えられる．レベル・スウィング局面では，打点が低い程，両肩関節の内外転トルク，およびバレル側の肩関節の内外旋トルクがバット長軸力の生成に大きく寄与し，特にノブ側の上肢関節トルクおよびバレル側の手関節トルクは，打点が低い程，バット・ヘッドスピード獲得に大きく寄与すると考えられる．また，左右の上肢関節において，概ね打点が低い程，関節トルク，関節トルクパワー，および関節トルクによる総仕事が大きくなることから，時間的拘束条件の伴う飛来球打撃における低めの打点高では，バット操作に対して各関節トル

クの短時間での増大が必要となり、他の打点高と比較して対応が難しくなることが示唆される。

最後に、今後の課題として、異なる競技レベルの被験者および飛来球条件における打撃動作、ならびに体幹および下肢を対象としたキネティクスの分析を行う必要があるだろう。

文 献

- 阿江数通・小池閑也・川村 卓 (2013) 打点高の異なる野球ティー打撃動作における左右各手のキネティクスの分析. バイオメカニクス研究, 17(1): 2-14.
- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. J. J. Sports Sci., 15: 155-162.
- Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., DeRenne, C., and Taylor, M.K. (2009a) Effects of bat grip on baseball hitting kinematics. J. Appl. Biomech., 25: 203-209.
- Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., DeRenne, C., and Taylor, M.K. (2009b) A comparison of age level on baseball hitting kinematics. J. Appl. Biomech., 25: 210-218.
- Fortenbaugh, D., Fleisig G., Onar-Thomas A., and Asfour S. (2011) The effect of pitch type on ground reaction forces in the baseball swing. Sports Biomechanics, 10(4): 270-279.
- 平野裕一 (1979) バットスイングの分析. 体育の科学, 29(8): 543-545.
- 平野裕一 (1984) バットによる打の動作. J. J. Sports Sci., 3(3): 199-208.
- 平野裕一 (1993) 当てる打撃と運ぶ打撃. J. J. Sports Sci., 12(3): 340-345.
- 広瀬茂男 (2005) ロボット工学—機械システムのベクトル解析—(改訂版) 改訂第17版. 裳華房: 東京, pp. 181-184.
- 石井泰光・山本正嘉・図子浩二 (2010) 体幹部の鉛直軸回りの回転運動から見た野球の投球とバッティングおよびゴルフのドライバースhotsの類似性. 体育学研究, 55: 63-79.
- 伊藤幸司・佐藤文宣・金子靖仙・島名孝次 (2001) バットの慣性特性がバットスイングに及ぼす影響. スポーツ工学シンポジウム講演論文集, 49-53.
- Jobe, F.W., Perry, J., and Pink, M. (1989) Electromyographic shoulder activity in men and women professional golfers. Am. J. Sports Med., 17(6): 782-787.
- Katsumata, H. (2007) A functional modulation for timing a movement: A coordinative structure in baseball batting. Human Movement Science, 26: 27-47.
- 勝又 宏・川合武司 (1996) 地面反力からみた異なる投球速度に対する野球の打撃動作の特性. 体育学研究, 40: 381-398.
- 川村 卓・功刀靖男・阿江通良 (2000) 熟練野球選手の打撃動作に関するバイオメカニクスの研究〜バットの動きに着目して〜. 大学体育研究, 22: 19-32.
- 川村 卓・島田一志・阿江通良 (2001) 熟練野球選手の打撃動作における両手の動きについて. 大学体育研究, 23: 17-28.
- 川村 卓・島田一志・高橋佳三・森本吉謙・小池閑也・阿江通良 (2008) 野球の打撃における上肢の動作に関するキネマティクスの研究: ヘッドスピード上位群と下位群のスウィング局面の比較. 体育学研究, 53: 423-438.
- Kitzman, E.W. (1963) Baseball: Electromyographic study of batting swing. Res. Q., 35(2): 166-178.
- 小池閑也 (2010) 力覚検出型センサーバットの開発. 機能材料, 30(8): 13-17.
- 小池閑也・阿江数通 (2012) スポーツ動作を科学する 16 野球打撃動作のバイオメカニクス. 体育の科学, 62(10): 773-781.
- 小池閑也・川村 卓・阿江通良 (2006) 野球打撃動作における四肢関節のトルク・パワー. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム2006講演論文集, 110-115.
- 小池閑也・木村大志・川村 卓・藤井範久・高橋佳三・阿江通良 (2003) 野球のティーバッティングにおける上肢関節のトルクパターン. 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2003 CD-ROM 講演論文集, “448-1”-“448-6”.
- Koike, S., Iida, H., Fujii, N., Kawamura, T., and Ae, M. (2004) An instrumented bat for simultaneous measurement of forces and moments exerted by the hands during batting. The Engineering of Sport, 5(2): 194-200.
- Mcintyre, D.R. and Pfausch, E.W. (1982) A kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. Res. Q. Exerc. Sport, 53(3): 206-213.
- Messier, S.P. and Owen, M.G. (1985) The mechanics of batting: Analysis of ground reaction forces and selected lower extremity kinematics. Res. Q. Exerc. Sport, 56(2): 138-143.
- Messier, S.P. and Owen, M.G. (1986) Mechanics of batting: Effect of stride technique on ground reaction forces and bat velocities. Res. Q. Exerc. Sport, 57(4): 329-333.
- 宮西智久 (2006) 打撃動作と体幹・四肢の角運動量-野

- 球のバッティングの場合（特集「巧みな動き」の脚と腕）. 体育の科学, 56(3): 181-186.
- 宮西智久・櫻井直樹（2009）野球の投・打動作の体幹捻転研究—SSC理論に着目して—. バイオメカニクスの研究, 13(3): 149-169.
- Morris, M., Jobe, F.W., Perry, J., Pink, M., and Healy, B.S. (1989) Electromyographic analysis of elbow function in tennis players. *Am. J. Sports Med.*, 17(2): 241-247.
- 内藤耕三・丸山剛生（2006）野球の投球速度を生成する運動依存トルク解析のための3次元上肢動力学的モデル. バイオメカニクス研究, 10(3): 146-158.
- 日本プロフェッショナル野球組織（2009）公認野球規則2009. ベースボールマガジン社：東京, pp. 38-39.
- 小田伸午・森谷敏夫・田口貞善（1991a）野球のティーバッティングにおける地面反力—レギュラー選手と非レギュラー選手の比較—. *J. J. Sports Sci.*, 10(1): 80-88.
- 小田伸午・森谷敏夫・田口貞善・松本珠希・見正富美子（1991b）地面反力からみた野球のティーバッティング技術. 体育学研究, 39: 255-262.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・川村 卓（2006a）野球における内外角の打撃ポイントが打撃動作に及ぼす影響. バイオメカニクス研究, 10(4): 222-234.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・高橋佳三・川村 卓（2006b）野球における打撃ポイントの高さが打撃動作に及ぼす影響. バイオメカニクス研究, 10(1): 2-13.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良（2008）異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 32(3): 158-165.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良（2010a）無作為投球速度変化状況での野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 34(1): 53-62.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良（2010b）異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関する下肢および体幹部のキネティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 34(3): 216-224.
- 田内健二・南形和明・川村 卓・高松 薫（2005）野球のティーバッティングにおける体幹の捻転動作がバットスピードに及ぼす影響. スポーツ方法学研究, 18(1): 1-9.
- Welch, C.M., Banks, S.A., Cook, F.F., and Draovitch, P. (1995) Hitting a baseball: A Biomechanical Description. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 22(5): 193-201.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human locomotion*, I: 92-93.
- Wu, G., van der Helm F.C.T., Veeger, H.E.J., Makhsous, M., Roy, P.V., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W., and Buchholz, B. (2005) ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion Part II: shoulder, elbow, wrist and hand, *J. Biomech.*, 38: 981-992.
- Zatsiorsky, V.M. (2002) Kinetics of human motion. *Human kinetics: Champaign*, pp. 117-197.

（平成25年9月11日受付）
（平成26年5月28日受理）