打点高の異なる野球ティー打撃動作における 体幹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 the trunk in baseball tee-batting motion at different hitting point heights. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 60: 635-649, December, 2015

Abstract : The purpose of this study was to clarify the kinetic features of the trunk under different hitting-point height conditions (high, middle, and low) in baseball tee-batting. Twenty-three collegiate male baseball players (age: 19.8 ± 1.3 yr, height: 1.74 ± 0.04 m, whole-body mass: 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 cameras, 250 Hz), and kinetic data for the individual hands were collected using an instrumented bat equipped with 28 strain gauges (1000 Hz). Three kinds of tee-batting heights were set for each participant based on the upper and lower limits of the strike zone according to the baseball rule. The torso was modeled with the rigid upper and lower trunk segments connected by a torso joint with three axes: the ante/retro flexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes. Kinetic variables, e.g. joint force and torque, mechanical power, and mechanical work, were obtained by inverse dynamic calculation. These data were expressed for a right-handed batter and normalized by the time of the forward swing from the swing start to the ball impact as 0-100%, and the time was divided into down-swing and level-swing phases in order to evaluate the mechanical work. From the last half of down-swing phase until ball impact, the retroflexion torque under the low condition was significantly larger than those under other conditions. The left rotation torque and positive torque power showed particularly large values in the level-swing phase regardless of the hitting-point height. The mechanical energy flow generated by the torso joint torque showed inflow from the lower trunk to the upper trunk, and outflow from the upper trunk to the individual upper arms regardless of the height condition over the forward swing. In addition, there were significant positive correlations between the positive mechanical work done by the joint torque about the right/left rotation axis and the maximum bat-head speed during the level-swing phase under the middle and low conditions. These results indicate that 1) the ante/retro flexion axis torque is needed to maintain the configuration of the upper trunk against the large centrifugal force exerted along the bat around the moment of ball impact, 2) the right/left rotation axis torque contributes to the generation of the large mechanical energy, the transfer of energy to the upper limbs, and the generation of the bat-head speed regardless of the height condition.

Key words : inverse dynamics calculation, torso joint, joint torque, energy flow

キーワード : 逆動力学演算, 体幹仮想関節, 関節トルク, エネルギーフロー

1) School of Sport, Exercise and Health Sciences,
Loughborough University
Loughborough University, Leicestershire, UK LE11
3TU

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. School of Sport, Exercise and Health Sciences, Lough-
borough University
Loughborough University, Leicestershire, UK LE11
3TU

2. Faculty of Health and Sport Sciences, University of
Tsukuba

1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

Corresponding author kazumichi.ae@gmail.com

1. 緒 言

野球の打撃動作では、可能な限りバット・ヘッドスピードを高めて、強い打球を得ることが打撃の優劣を決定する要因の1つとなる（川村ほか，2008；宮西，2006；田内ほか，2005）。しかしながら、打撃の成功率を低下させるために、投手はボールコースおよびタイミングを様々に変化させて投球を行う。したがって、打者は投球コースに対応しながらバット・ヘッドスピードを生成するという運動課題をごく短時間に実現しなければならない。このため、野球の打撃動作は数多くあるスポーツ動作の中でも複雑な運動の1つに位置づけられるだろう。

安打の確率を高めるために必要となる強い打球の獲得には、大きなバット・ヘッドスピードが必須条件となること（Sawicki et al., 2003）から、野球の打撃動作に関する先行研究において、バット・ヘッドスピードは打撃動作を評価する際の有効な指標とされている。このため、バットの動きを始めとして、身体各関節の動きについて検討したキネマティクスの分析が数多く報告されている（平野，1984；川村ほか，2000，2001，2008，2012；城所ほか，2011，2012；前田，2001；Tabuchi et al., 2007；及川ほか，1996；高木ほか，2008，2010）。加えて，Welch et al. (1995) は、肩よりも先に、腰が打撃方向への回転を始めることから、下肢と上肢とを繋げる体幹部の重要性について示唆しており、最近では体幹の回旋あるいは捻転動作とバット・ヘッドスピードとの関係についての研究が数多く報告されている（Escamilla et al., 2009a, 2009b；石井ほか，2010；宮西，2004，2006；宮西・櫻井，2009；森下ほか，2013；田内ほか，2005）。このうち宮西（2004，2006）は、ピッチングマシンを用いた飛来球に対する大学野球選手の打撃動作におけるバットおよび身体の角運動量について検討し、バット・ヘッドスピードの生成には、特に体幹の回旋動作による角運動量が寄与することを報告している。また、田内ほか（2005）は、大学野球選手

を対象とした分析から、バット・ヘッドスピードの増加には、体幹の大きな捻転角速度によって肩の捻り戻しの角加速度を高めることが重要であると報告している。このように、体幹に関する研究は、主にキネマティクスの観点から検討されたものであり、体幹の捻転動作が大きな関節トルクを発揮することに寄与すると推察している報告（Fleisig et al., 2013；宮西・櫻井，2009；田内ほか，2005）があるものの、関節力およびトルクといったキネティクスの観点から検討したものはない。

他方、バット・ヘッドスピードを高めることに着目した多くの研究に対して、田子ほか（2006a, 2006b）は、異なるボールコースに対応するための打撃動作の特徴を明らかにするために、高低および左右の計9区分に設定したコースにティーアップしたボールの打撃動作に対するキネマティクスの分析を行っている。その結果、まず打点高の違いに対しては、主に四肢関節角の調整が優先される傾向にあり、その中でも打点が高い程、打撃方向への肩の回転角が大きくなること、つぎに内外角の違いに対しては、特に内角を打撃する際に、ステップ脚の接地以降において肩および骨盤の打撃方向への回転角が大きくなることを示している。これらのキネマティクスの報告に対して、阿江ほか（2013）は、打点高の違いに対応する際の動作の生成要因を明らかにするために、センサー・バット（小池，2010）を用いて異なる打点高条件における左右各手のキネティクスの分析を行い、異なる打点高への対応には、主に各手におけるバット長軸力の鉛直成分、バット起し倒し軸まわりのモーメント、およびこの軸まわりモーメントとして作用する両手による偶力成分が寄与することを報告している。さらに、この結果を踏まえて、阿江ほか（2014）は左右上肢に対するキネティクスの分析を行い、異なる打点高へ対応するために、主に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、そして、ノブ側（グリップエンド側）上肢の肩、肘、および手首の各関節トルク、ならびにバレル側（バット・ヘッド側）の手関節トルクが、打点が低くなる程、

大きくなるバット・ヘッドスピードの生成に寄与していることを報告している。これらの研究によって、打点高の違いに対応するための左右各手および上肢に関するキネティクスの特徴が明らかになったものの、体幹部あるいは下肢に関する特徴については未だ明らかにはなっていない。ここで野球の投球動作における体幹に関する先行研究に着目してみると、体幹では左右肋骨下端の midpoint に設けた仮想関節において、捻転動作を行うことにより大きなトルクが発揮され、下肢および体幹の各関節によって生成された力学的エネルギーが上肢末端部へと伝達されているとの報告（宮西ほか、1997；宮西・櫻井、2009；島田ほか、2000、2004）がある。したがって、阿江ほか（2014）の上肢のキネティクスの分析によって、両肩関節の屈曲伸展および内外転トルクが顕著に大きく、とりわけ肩関節の屈曲伸展トルクは打点高への対応に寄与することが明らかとなっていることから、左右の肩関節と連結する体幹部のキネティクスの特徴を明らかにすることは、打点高に対応するための有用な知見の獲得に繋がるものと考えられる。

そこで本研究では、体幹を前後屈、左右側屈、左右回旋の3軸から構成される体幹仮想関節によって連結された上胴および下胴からなる剛体セグメントによってモデル化し、異なる打点高条件における体幹仮想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体幹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におけるキネティクスの変量を用いて、左右上肢の逆動力学演算により体幹仮想関節の関節力および関節トルク、ならびに力学的パワーおよび仕事を算出し、これらの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、体幹の役割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，体質量： 74.1 ± 6.2 kg，競技歴： 12.0 ± 2.1 年，右打11名，左打12名）を被験者として，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，センター方向に強く打撃するように指示した．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（2013，2014）と同じ設定により各打点高を設定した．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点に反射マーカートを貼付し，光学式3次元自動動作分析装置（Vicon Motion Systems 社製，VICON-MX，カメラ12台，250 Hz，以降 VICON）を用いて，各マーカートの3次元座標を計測した．

左右上肢とバットによる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，センサー・バット（小池，2010）を用いた．すなわち，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．データ収集の方法については，阿江ほか（2013，2014）と同一とした．なお，本研究では，バット・ヘッド側をバレル側，グリップエンド側をノブ側と表記する．

2.2 データ処理

分析試技については，ボールがセンター方向へと打撃され，被験者の5段階評価による内省点が3以上であり，その点数が最も高かった1試技（成功試技）を対象とした．VICON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 体幹座標系の定義

本研究では、3次元動作を評価するために、先行研究(村田・藤井, 2014; 島田ほか, 2004)を参考にしてセグメント座標系を上胴および下胴のそれぞれに対して設定した。また、左右の股関節中心については、臨床歩行分析研究会の提唱する推定方法から算出した(倉林ほか, 2003)。

(1) 上胴座標系

上胴座標系 R_{ut} について、左右肋骨下端との中点 (ribC) から、胸骨上縁と第7頸椎との中点 (clavC) へと向かう単位ベクトルを z_{ut} 、左肋骨下端 (ribL) から右肋骨下端 (ribR) へと向かうベクトルを s_{ut} とし、 z_{ut} と s_{ut} との外積により得た単位ベクトルを y_{ut} として、 y_{ut} と z_{ut} との外積からなる単位ベクトル x_{ut} を求めた (Fig. 1)。

(2) 下胴座標系

下胴座標系 R_{lt} について、左右股関節中心の中点 (hipC) から左右肋骨下端の中点 (ribC) へと向かうベクトルを z_{lt} 、左股関節中心 (hipL) から右股関節中心 (hipR) へと向かうベクトルを s_{lt} とし、 z_{lt} と s_{lt} との外積により得た単位ベクトルを y_{lt} として、 y_{lt} と z_{lt} との外積からなる単位ベクトル x_{lt} を求めた (Fig. 1)。

Fig. 1 Definition of the segment coordinate systems of the upper trunk and lower trunk.

2.3.2 関節角度およびセグメント角速度

上胴と下胴間 (左右肋骨下端の中点) に3自由度 (前後屈, 左右側屈, 左右回旋) の仮想的な関節 (以下「体幹仮想関節」と略す) を設けた。そして、上述した下胴座標系 (R_{lt}) に対する上胴座標系 (R_{ut}) の相対的なオイラー角 ($x-y-z$) を体幹の関節角度として、回転順に前後屈角度, 左右側屈角度, および左右回旋角度とそれぞれ定義した。また、上胴および下胴に設定したセグメント座標系における各軸方向の単位ベクトルを時間微分することによって各セグメントの角速度ベクトルを求めた。

2.3.3 関節力およびトルク

本研究では、センサー・バットによって計測した左右各手のバット作用力および作用モーメントから左右上肢の逆動力学演算を行い、左右の肩関節に作用する力およびモーメントを算出した (阿江ほか, 2014)。上胴を剛体リンクとしてモデル化し (Fig. 2), その際、上胴セグメントの遠位端に作用する力を f_{shR} , f_{shL} , f_{neck} 、そして遠位端に作用するモーメントを n_{shR} , n_{shL} , n_{neck} とすると (shR: 右肩関節, shL: 左肩関節, neck: 頸部関節), 上胴セグメントの近位端である体幹仮想関節に作用する力 f_{tr} およびモーメント n_{tr} (tr: 体幹仮想関節) は、

$$f_{tr} = -m_{ut}\ddot{x}_{ut} + m_{ut}g + f_{shR} + f_{shL} + f_{neck} \quad (1)$$

Fig. 2 Free body diagram for the calculation of the joint force and torque of the upper trunk segment.

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{tr} = & \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(shR)}} \times \mathbf{f}_{shR} + \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(shL)}} \\ & \times \mathbf{f}_{shL} + \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(neck)}} \times \mathbf{f}_{neck} - \mathbf{r}_{ut, \overline{cgP}} \times \mathbf{f}_{tr} \\ & - \hat{\mathbf{I}}_{ut} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ut} - \boldsymbol{\omega}_{ut} \times (\hat{\mathbf{I}}_{ut} \boldsymbol{\omega}_{ut}) + \mathbf{n}_{shR} + \mathbf{n}_{shL} \\ & + \mathbf{n}_{neck} \end{aligned} \quad (2)$$

と算出することができる．ここで，式(1)および(2)における $\mathbf{m}_{ut}$ は上胴セグメントの質量， $\mathbf{x}_{ut}$ は静止座標系における上胴セグメントの重心位置ベクトル， $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル ($\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -9.807]^T$)， $\hat{\mathbf{I}}_{ut}$ は静止座標系における上胴セグメントの慣性行列， $\boldsymbol{\omega}_{ut}$ は静止座標系における上胴セグメントの角速度ベクトルをそれぞれ示している．また， $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(shR)}}$ ， $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(shL)}}$ ， $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD(neck)}}$ ，および $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgP}}$ は，上胴セグメント重心から遠位端，および近位端に向かう位置ベクトルをそれぞれ示している．なお，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 $\mathbf{n}_{tr}$ を，上胴座標系 $\mathbf{R}_{ut}$ の各軸方向単位ベクトルに投影したものを，体幹仮想関節トルク ($\mathbf{T}_{tr}$) とした．

2.3.4 関節力パワー，トルクパワー，セグメントトルクパワーおよび力学的仕事

関節 j における関節力 $\mathbf{F}_j$ および関節トルク $\mathbf{T}_j$ から，関節力パワー $\mathbf{P}_{JF,j}$ ，関節トルクパワー $\mathbf{P}_{JT,j}$ ，およびセグメントトルクパワー $\mathbf{P}_{ST,j}$ が，以下の式により求まる．

$$\mathbf{P}_{JF,j} = \mathbf{F}_j \cdot \mathbf{V}_j \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{JT,j} = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_j \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{ST,j} = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_{ut} \quad (5)$$

ここで， $\mathbf{F}_j$ は関節 j (j = 体幹仮想関節，パレル側肩関節，ノブ側肩関節) に作用する関節力， $\mathbf{T}_j$ は関節 j が発揮する関節トルク， $\boldsymbol{\omega}_j$ は関節の角速度をそれぞれ示している．そして，これらの各パワーのうち，体幹仮想関節トルクパワーを分析区間，および符号の正負別に時間積分することによって力学的仕事 (以降，仕事) を算出した．

2.4 分析範囲の定義，データの規格化および統計処理

分析範囲については，阿江ほか (2013, 2014) と同様に，スウィング開始時点からボールインパクト (以下「インパクト」と略す) までのフォワード・スウィング期を対象として，スウィング開始時点からバット・ヘッド速度の鉛直下方成分が最大となる時点までをダウン・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．

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，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．なお，局面の切り替わりは各打点高の平均値がおおよそ80%となることから，各図におけるレベル・スウィング局面 (80—100%) を網掛けによって示すこととする．

統計処理については，各算出項目における3打点高間の有意差の要因に対して，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 体幹仮想関節の角度

フォワード・スウィング期における体幹仮想関節の前後屈，左右側屈および左右回旋角度を Fig. 3 に示す．同図(a)に前後屈角度 (後屈：正，前屈：負)，同図(b)に左右側屈角度 (右側屈：正，左側屈：負)，同図(c)に左右回旋角度 (左回旋：正，右回旋：負) をそれぞれ示し，線種の違いが打点高条件の違い (高：点線，中：黒線，低：灰色線) を示している．また，打点高間に有意差がみられた時点には記号を付している (高一中：△，高一低：*，中一低：×)．なお，各データは全被験者の値を平均したものであり，標

Fig. 3 Curves of the joint angle of the ante/retro flexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes of the torso joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

準偏差の表記については視認性を考慮して省略している。

まず同図(a)から、前後屈角度について、スウィング開始から前屈のみの角度がみられ、打点高による違いでは、打点が低い程、前屈角度が有意に大きかった。つぎに同図(b)から、左右側屈角度について、スウィング開始から40%付近にかけては左側屈角度を示した後、インパクトに向けて右側屈角度が増大していた。打点高による違いでは、スウィング開始から15%付近においては低めの左側屈角度が高めよりも、55%付近からインパクトにかけては低めの右側屈角度が高めよりも、80%付近からインパクトにかけては真中の右側屈角度が高めよりもそれぞれ有意に大きかった。最後に同図(c)から、左右回旋角度について、スウィング開始から85%付近にかけては右回旋角度を示した後、インパクトに向けて左回旋角度が増大していた。打点高による違いでは、スウィング開始から30%付近においては真中の右回旋角度が高めよりも、90%付近からインパクトにかけては高めの左回旋角度が真中よりもそれぞれ有意に大きかった。スウィング開始から80%付近にかけては低めの右回旋角度が高めよりも、それ以降においては高めの左回旋角度が低めよりもそれぞれ有意に大きかった。25%から80%付近にかけては低めの右回旋角度が真中よりも、それ以降においては真中の左回旋角度が低

めよりもそれぞれ有意に大きかった。

3.2 体幹仮想関節のトルク

フォワード・スウィング期における体幹仮想関節の前後屈軸、左右側屈軸および左右回旋軸におけるトルクを Fig. 4 に示す。同図(a)に前後屈トルク（後屈：正、前屈：負）、同図(b)に左右側屈トルク（右側屈：正、左側屈：負）、同図(c)に左右回旋トルク（左回旋：正、右回旋：負）をそれぞれ示し、図内の各線および各印の仕様は Fig. 3 と同様である。

まず同図(a)から、前後屈トルクについて、スウィング開始から後屈のみのトルクがみられ、50%付近まで増大し、70%付近にかけて一旦減少した後、インパクトに向けて再び増大していた。打点高による違いでは、主に30%付近以降から打点が低い程、後屈トルクが有意に大きかった。つぎに同図(b)から、左右側屈トルクについて、スウィング開始から80%付近にかけては右側屈トルクがみられた後、インパクトに向けて左側屈トルクが増大していた。打点高による違いでは、スウィング開始から30%付近にかけては真中の右側屈トルクが高めよりも、スウィング開始から40%付近にかけては低めの右側屈トルクが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。最後に同図(c)から、左右回旋トルクについて、スウィング開始から左回旋のみのトルクがみられ、特に

Fig. 4 Curves of the joint torque of the ante/retro flexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes of the torso joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

Fig. 5 Curves of the joint torque power of the ante/retro flexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes of the torso joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

90%付近以降から急激に増大していた。打点高による違いでは、スウィング開始から10%付近、70%から90%付近にかけては真中の左回旋トルクが高めよりも有意に大きかった。主に65%からインパクトにかけては低めの左回旋トルクが高めよりも有意に大きかった。65%から85%付近にかけては低めの左回旋トルクが真中よりも、インパクト付近においては真中の左回旋トルクが低めよりもそれぞれ有意に大きかった。

3.3 体幹の力学的パワー

3.3.1 関節トルクパワー

フォワード・スウィング期における体幹仮想関節の前後屈軸、左右側屈軸および左右回旋軸に関する関節トルクパワーをFig. 5に示す。同図(a)に前後屈軸、同図(b)に左右側屈軸、同図(c)に左右回旋軸の関節トルクパワーをそれぞれ示し、図内の各線および各印の仕様はFig. 3と同様である。

まず同図(a)から、前後屈トルクパワーについて、スウィング開始から40%付近にかけて負のトルクパワーがみられ、60%から80%にかけて

はほぼゼロを示した後、インパクトに向けて正のトルクパワーが顕著に増大していた。打点高による違いでは、20%から35%付近にかけては真中の負のトルクパワーが高めよりも、85%以降においては真中の正のトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。10%から40%付近にかけては低めの負のトルクパワーが高めよりも、40%から60%付近にかけては高めの正のトルクパワーが低めよりも、80%付近からインパクトにかけては低めの正のトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。45%から60%付近にかけては低めの負のトルクパワーが真中よりも、80%から90%付近にかけては低めの正のトルクパワーが真中よりもそれぞれ有意に大きかった。つぎに同図(b)から、左右側屈トルクパワーについて、スウィング開始から80%付近にかけて正のトルクパワーが増大し、60%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに向けて負のトルクパワーが増大していた。打点高による違いでは、スウィング開始から30%付近においては真中の正のトルクパワーが高めよりも、インパクト付近においては真中の正のトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。スウィング開始から60%付近においては低めの正のトルクパワーが高めよりも、85%から95%付近にかけては低めの負のトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。10%から30%付近にかけては低めの正のトルクパワーが真中よりも有意に大きかった。最後に同図(c)から、左右回旋トルクパワーについて、主に20%以降からインパクトに向けて正のトルクパワーが顕著に増大していた。打点高による違いでは、70%から90%付近にかけては高めの正のトルクパワーが真中よりも有意に大きかった。65%から90%付近にかけては低めの正のトルクパワーが高めよりも、インパクト付近においては高めの正のトルクパワーが低めよりもそれぞれ有意に大きかった。70%から80%付近にかけては低めの正のトルクパワーが真中よりも、インパクト付近においては真中の正のトルクパワーが低めよりもそれぞれ有意に大きかった。

3.3.2 関節力パワーおよびセグメントトルクパワー

フォワード・スウィング期における上胴セグメントに関する各関節の関節力パワーおよびセグメントトルクパワーをFig. 6に示す。同図の左列が関節力パワーを、そして同図の右列が上胴のセグメントトルクパワーを示し、上段(a), (d)に体幹仮想関節、中段(b), (e)にバレル側の肩関節、下段(c), (f)にノブ側の肩関節での値をそれぞれ示している。同図内の各線および各印の仕様はFig. 3と同様である。ここで、関節力パワーおよびセグメントトルクパワーは、それぞれ関節力および関節トルクによるセグメントへの力学的エネルギーの時間変化率を示し、正值は上胴への力学的エネルギーの流入、負値は上胴からの力学的エネルギーの流出となる。また隣接するセグメント間では、この力学的エネルギーの増減が生じることから、これらのパワーを評価することは、セグメント間における力学的エネルギーの伝達を評価することとなる(阿江・藤井, 2002, pp. 122-126)。

関節力パワーについて、まず同図(a)から、体幹仮想関節では、主に40%付近以降から正の関節力パワーが増大し、80%付近においてピークがみられた後、インパクトに向けて値が減少していた。打点高による違いでは、35%から70%付近およびインパクト付近においては真中の正の関節力パワーが高めよりも有意に大きかった。40%から65%付近、90%からインパクトにかけては低めの正の関節力パワーが高めよりも有意に大きかった。90%からインパクトにかけては低めの正の関節力パワーが真中よりも有意に大きかった。つぎに同図(b)から、バレル側の肩関節では、スウィング開始から30%付近にかけては負の関節力パワーが、50%から70%付近にかけては正の関節力パワーがみられた後、再び負の関節力パワーがみられた。打点高による違いでは、主に70%から80%付近にかけては高めの正の関節力パワーが真中よりも有意に大きかった。5%から25%付近においては低めの負の関節力パワーが高めよりも、55%から70%付近にかけては高

Fig. 6 The mechanical energy flows for the upper trunk of the joint force power and segment torque power in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

めの正の関節力パワーが低めよりも、70%から85%付近にかけては低めの負の関節力パワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。20%から25%付近においては低めの負の関節力パワーが真中よりも、55%から70%付近にかけては真中の正の関節力パワーが低めよりも、70%から75%付近にかけては低めの負の関節力パワーが真中よりもそれぞれ有意に大きかった。最後に同図(c)から、ノブ側の肩関節では、負の関節力パワーのみがみられ、スウィング開始から70%付近にかけて顕著に増大し、75%付近においてピークがみられた後、インパクト付近に向けて減少していた。打点高による違いでは、スウィング

開始から10%付近、35%から60%付近、インパクト付近においては真中の負の関節力パワーが高めよりも有意に大きかった。スウィング開始から70%付近、90%付近以降においては低めの負の関節力パワーが高めよりも有意に大きかった。10%から30%付近、90%付近以降においては低めの負の関節力パワーが真中よりも有意に大きかった。

上腕のセグメントトルクパワーについて、まず同図(d)から、体幹仮想関節では、正のセグメントトルクパワーのみがみられ、スウィング開始から増大し、60%から90%付近にかけてほぼ一定値を示した後、インパクト付近においては急激に

増大していた。打点高による違いでは、70%から90%付近にかけては高めの正のセグメントトルクパワーは真中よりも、主に60%から90%付近にかけては低めの正のセグメントトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。つぎに同図(e)から、バレル側の肩関節では、負のセグメントトルクパワーのみがみられ、その変化パターンはほぼ緩やかな右下がりを示しながらインパクトを迎えていた。打点高による違いでは、80%から90%付近にかけては真中の負のセグメントトルクパワーが高めよりも有意に大きかった。主に45%から65%付近にかけては高めの負のセグメントトルクパワーが低めよりも、80%から90%付近にかけては低めの負のセグメントトルクパワーが高めよりもそれぞれ有意に大きかった。最後に同図(f)から、ノブ側の肩関節では、負のセグメントトルクパワーのみがみられ、

40%から90%付近にかけてはほぼ一定値を示した後、インパクトに近づくにつれて負のセグメントトルクパワーが増大していた。打点高による違いでは、80%から90%付近にかけては高めの負のセグメントトルクパワーが真中よりも有意に大きかった。75%から90%付近、インパクト付近においては高めの負のセグメントトルクパワーが低めよりも、真中の負のセグメントトルクパワーが低めよりもそれぞれ有意に大きかった。

3.4 バット・ヘッドスピードと体幹仮想関節の左右回旋トルクによる力学的仕事の

体幹仮想関節の左右回旋トルクは、他の軸のトルクに比べて顕著に値が大きくなり、また力学仕事においてはほぼ正仕事のみがみられた。そこで本研究では、バット・ヘッドスピードの最大値と左右回旋トルクによる正仕事の関係を Fig. 7 に

Fig. 7 Relationships between the maximum value of the bat-head speed and the positive work done by the right/left rotation axis of the torso joint torque for the down-swing and level-swing phases.

示す。上段(a), (b)に高め, 中段(c), (d)に真中, 下段(e), (f)に低めの各打点高条件による値をそれぞれ示している(左列: ダウン・スウィング局面, 右列: レベル・スウィング局面)。

まず高めについて, 同図(a), (b)から, 両局面ともにバット・ヘッドスピード最大値と正仕事との間には有意な相関関係はみられなかった。つぎに真中について, 同図(c), (d)から, レベル・スウィング局面において, バット・ヘッドスピードの最大値と正仕事との間に有意な正の相関がみられ($r=0.537, p<0.05$), 最後に低めについて, 同図(e), (f)から, レベル・スウィング局面において, バット・ヘッドスピードの最大値と正仕事との間に有意な正の相関がみられた($r=0.442, p<0.05$)。

4. 考 察

4.1 体幹仮想関節のトルクおよびトルクパワー

本研究における打撃動作は, 静止球を打撃するティー打撃を対象としたものである。このため, 本研究によって得られた知見は, 打者が予め打点高を認識した上での打撃動作に関するものであり, 飛来球打撃に関する知見とは必ずしも一致するものではない。

4.1.1 前後屈軸について

ダウン・スウィング局面後半において打点が低い程, 後屈トルクが大きかった(Fig. 4(a))。その一方で, 同局面における前屈角度は打点が低い程, 大きくなるものの, その角変位は打点高によらずに緩やかとなっていた(Fig. 3(a))。したがって, 体幹の前後屈運動には, インパクトに近づくにつれて大きくなるバットの遠心力に抗するために上胴の姿勢を維持する働きがあると考えられる。ここで野球の打撃動作では, 体幹仮想関節の角変位, すなわち動作の範囲は上肢関節と比較して小さいと報告(川村ほか, 2008; 田子ほか, 2006a, 2006b)されていることから, 体幹の動作がバットの打点位置に及ぼす影響, すなわち打点が低い程, 大きくなる鉛直下方へのバットの変位

に対する寄与は小さいと推察される。

4.1.2 左右側屈軸について

スウィング開始から40%付近にかけて打点が低い程, 右側屈トルクが大きく(Fig. 4(b)), スウィング開始から60%付近にかけて打点が低い程, 正のトルクパワーが有意に大きかった(Fig. 5(b))。また, スウィング開始から15%付近にかけて打点が低い程, 左側屈角度が有意に大きく, 60%付近からインパクトにかけては打点が低い程, 右側屈角度がそれぞれ有意に大きかった(Fig. 3(b))。このように, 体幹の左右側屈角度には打点高間に統計的な有意差はみられたものの, その角度差および角変位は小さいことから, 前後屈動作と同様に, 右側屈トルクがバット打点位置の鉛直変位に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.1.3 左右回旋軸について

インパクト付近において, 体幹仮想関節の左右回旋トルクおよび正のトルクパワーは打点が高い程, 大きかった(Fig. 4(c), Fig. 5(c))。田子ほか(2006a)は, 異なる打点高への対応においては上胴および下胴の回転よりも, 四肢関節による調整が優先されると報告している。これらのことを考慮すると, 左右回旋トルクには打点高間に差がみられたものの, 異なる打点高に対応するためのバットの鉛直変位に大きくは寄与しないものと示唆される。また田子ほか(2006a)は, 上胴の鉛直軸回転角度について, 低めの打点高を打撃する際には, 高めおよび真中の打点高に比べて打撃方向への回転角度が小さくなることを報告している。したがって, 体幹仮想関節が右回旋角から左回旋角へと変化する時点(80%付近)では, 打点が低い程, 左回旋トルクが大きく, その後インパクトに向けて左回旋角度が大きくなるにつれて打点が高い程, 左回旋トルクが大きかった。すなわち, 体幹仮想関節が右回旋角から左回旋角へとその回旋角度が変化することによって同じ左回旋のトルク発揮がなされていても, 動作生成に必要な発揮トルクの大きさが打点高によって変化するという特徴がみられた。なお, 野球打撃に関する研究では, バット・ヘッドスピードが打撃動

作を評価する指標の1つとされていることから、大きなトルク発揮がみられた体幹仮想関節の左右回旋トルクとバット・ヘッドスピードとの関係については、後ほど述べることとする。

4.2 上胴の力学的エネルギーの流れ

4.2.1 セグメントトルクパワーについて

下胴から上胴へと流入する力学的エネルギーでは、体幹仮想関節の関節力パワーによるものに比べて、セグメントトルクパワーによるものが顕著に大きくなることが明らかとなった (Fig. 6(a), (d)). 上胴から左右の上腕へと流出する力学的エネルギーでは、特にレベル・スウィング局面において打点高間による有意な差がみられた。しかしながら、その差は小さい傾向にあり、そのほとんどがノブ側の上腕へと流出していた (Fig. 6(e), (f)). 上述したように、特にレベル・スウィング局面において、体幹仮想関節の左右回旋トルクは顕著に大きかった (Fig. 4(c)). また、阿江ほか (2014) は、左右の肩関節屈曲伸展トルクが打点高への対応に寄与し、特にノブ側の肩関節屈曲伸展トルクがバレル側よりも大きくなること、インパクト付近において左右の肩関節内外転トルクは顕著に大きくなるものの、打点高への対応に大きくは寄与しないことを報告している。これらのことから、左右回旋トルクは、大きな力学的エネルギーの生成、および上胴を介して左右上肢、とりわけ大きなトルク発揮がなされるノブ側上肢へと大きな力学的エネルギーを伝達して、打点高間によらず、バット・スウィングを行う際に必要となるバット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。

他方、宮西・櫻井 (2009) は、野球の打撃動作における体幹の捻転様式は野球の投球動作とほぼ共通であると報告している。そこで、野球の投球動作における力学的エネルギーの流れについて着目してみると、野球の投球動作におけるストライド脚接地前後の局面では、軸脚股関節の伸展および内転トルクによって力学的エネルギーが生成されること (島田ほか, 2000)、この軸脚により生成された力学的エネルギーは下胴を介して上胴

へと伝達されること (島田ほか, 2004) が報告されている。また、体幹の最大捻転角速度は、下肢から体幹部へと流入した力学的エネルギー、ならびに体幹仮想関節により生成された力学的エネルギーによって決定されることが示唆されている (石井ほか, 2010)。これらを考慮すると、下胴の左右回転角度、および下肢から体幹部への力学的エネルギーの流れに打点高の違いによる差が生じたことから、下胴から上胴へと作用する関節力やトルクにも影響がみられ、体幹仮想関節の回旋運動に対しても打点高間による力学的エネルギーの流れに差が生じたものと推察される。加えて、野球の打撃動作では、フォワード・スウィング期において身体の並進運動よりも回転運動が主となることから、セグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流入出に対して、下胴から上胴への流入、ならびに上胴から左右上腕への流出が、関節力による流入出よりも顕著に大きくなったと考えられる。

4.2.2 関節力パワーについて

関節力パワーによる力学的エネルギーの流れはセグメントトルクパワーによるものと比べて顕著に小さかった (Fig. 6) もの、ダウン・スウィング局面後半では、上胴とバレル側上腕間の力学的エネルギーの流出量には打点高間による差がみられた (Fig. 6(b)). ここで小池ほか (2003, 2006) は、バレル側上肢は主にバット軌道の制御を行うと報告し、阿江ほか (2014) は、打点が低い程、バットを鉛直変位させるために上肢各関節の総仕事が大きくなることを報告している。これらのことから、いずれの打点高条件においても、バレル側上腕から上胴への力学的エネルギーの流入、すなわちバレル側上腕の動作を抑制するような働きがあることが示唆される。ここで、図は割愛しているが、野球の打撃動作における体幹の関節力は、全フォワード・スウィング期において下胴から上胴へと作用し、上胴セグメントの質量が大きいこと (阿江, 1996) から必然的にその値自体が大きくなるものの、セグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの伝達量と比較してその値は小さいことから、打点高によらず、主

に上半身を支持することにより安定したスウィングを行うことに寄与していると推察される。

他方、ダウン・スウィング局面後半において、下胴から上胴へと流入した力学的エネルギーが顕著に小さかったのに対して、上胴からノブ側上腕へと流出した力学的エネルギーは顕著に大きかった (Fig. 6(a), (c)). 先行研究では、ノブ側手のバット長軸力 (遠心力) が顕著に大きくなり、特に肩関節トルクがこのバット長軸力に抗するように寄与すると報告されている (阿江ほか, 2013, 2014; 小池ほか, 2003, 2006). したがって、ノブ側肩関節において、主に体幹の左右回旋動作によってバット長軸力に影響を及ぼす肩関節力が生成され、また肩関節の並進速度も大きくなり、上胴からノブ側上腕へと流出する力学的エネルギーが顕著に大きくなったと考えられる。しかしながら、同局面における関節力パワーには打点高間において顕著な差がみられなかったことから、上胴から左右上腕への関節力パワーによる力学的エネルギーの流れは、打点高の違いによらず、スウィングを行う際に共通にみられるものであることが示唆される。

4.3 バット・ヘッドスピードと体幹仮想関節のキネティクスとの関係

野球の打撃動作に関する先行研究において、体幹の左右回旋動作がバット・ヘッドスピードに大きく関係することが数多く報告されている (石井ほか, 2010; 川村ほか, 2012; 宮西, 2004, 2006; 宮西・櫻井, 2009; 森下ほか, 2013; 田内ほか, 2005). 加えて、実際の指導の現場では、下胴と上胴との間に捻転角を作ること、すなわち体幹の‘割れ’を作ることの重要性が報告されている (西井, 2006). そこで本研究では、バット・ヘッドスピードの最大値と左右回旋トルクによる正仕事との関係について検討した結果、真中および低めのレベル・スウィング局面において正の相関関係がみられた (Fig. 7(d), (f)). このため、打点が低い程、左右回旋トルクがバット・ヘッドスピードの生成に及ぼす影響が大きくなると推察することもできるだろう。その一方で、田

内ほか (2005) は、体幹の角速度はバット・ヘッドスピードを高めるための必要条件であるが十分条件ではないとの示唆をしている。また、阿江ほか (2014) は、打点が低い程、左右の上肢関節における関節トルク、および関節トルクによる力学的仕事は概ね大きくなると報告している。本研究では、左右回旋トルクおよび正のトルクパワーの打点高間による差はそこまで顕著ではなかったのに対して (Fig. 4(c), Fig. 5(c)), 打点が低い程、バット・ヘッドスピードは大きかった。これらのことを考慮すると、バット・ヘッドスピードの打点高間による差に対して、体幹仮想関節の左右回旋トルクが及ぼす影響は比較的小さく、左右の上肢関節トルクの打点高間による差が大きく影響を及ぼすと考えられる。加えて、体幹の筋力および動作が四肢の力強い動作に大きく寄与すること (平野, 1992), 野球の打撃動作では、腰が肩に先立って打撃方向へと回転されること (川村ほか, 2008; 田子ほか, 2006a, 2006b; Welch et al., 1995), 体幹の捻転能力よりも骨盤を回転させる能力を高めることが重要であること (石井ほか, 2010), そして下肢が骨盤 (下胴) の回転に大きく寄与すること (高木ほか, 2010) が報告されている。これらのことから、下肢による骨盤の回転に伴う体幹仮想関節トルクの発揮に加えて、下肢および体幹により生成された力学的エネルギーを、左右上肢を介してバットへと効率的に伝達できることが、バット・ヘッドスピードの打点高間による差を生成する打撃技術の1つの要因となることが本研究の結果より示唆されるだろう。

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体幹のキネティクスの分析から、打点高の違いに対応するための体幹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知見をまとめると以下になる。

① 体幹仮想関節の前後屈トルクについては、打

点が低い程, 大きくなる鉛直下方へのバットの
の変位およびバットの遠心力に対して上腕の
姿勢を維持する働きがある。

- ② 体幹仮想関節の左右回旋トルクについては,
主にレベル・スウィング局面において打点高
の違いによる回旋角度の差, および右回旋角
から左回旋角への回旋角度の変化により, 左
回旋トルクおよびその正のトルクパワーの大
きさを変化させる必要がある。
- ③ 体幹仮想関節の左右回旋トルクについては,
大きな力学的エネルギーの生成, および上腕
を介して左右上肢, とりわけノブ側上肢へと
大きな力学的エネルギーを伝達して, 打点高
間によらず, バット・ヘッドスピードの生成
に寄与する。
- ④ 体幹仮想関節の関節力については, セグメン
トトルクパワーと比較して関節力パワーによ
る力学的エネルギーの伝達量が小さかったこ
とから, 打点高の違いによらず, スウィング
を安定して行うための身体の支持に寄与する。

文 献

- 阿江数通・小池関也・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.
- 阿江数通・小池関也・川村 卓 (2014) 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. 体育学研究, 59(2): 431-452.
- 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.
- 阿江通良・藤井範久 (2002) バイオメカニクス20講.
朝倉書店, pp. 122-126.
- 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.
- Fleisig, G. S., Hsu, W. K., Fortenbaugh, D., Cordover,
A., and Press, J. M. (2013) Trunk axial rotation in
baseball pitching and batting. Sport Biomech., 12(4):
324-33.
- 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 (1992) 打つ科学. 大修館書店.
- 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ショットの類似性. 体
育学研究, 55: 63-79.
- 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的研究〜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・小池関
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.
- 川村 卓・島田一志・山下 優・奈良隆章・小池関也
(2012) 野球のトス打撃における投球角度の違いがス
ィング動作に及ぼす影響—肩・腰およびバットの回
転角度に着目して—. 筑波大学体育科学系紀要, 35:
59-66.
- 城所収二・若原 卓・矢内利政 (2011) 野球のバッテ
ィングにおける打球飛距離と打球の運動エネルギー
に影響を及ぼすスィング特性. バイオメカニクス研
究, 15(3): 78-86.
- 城所収二・若原 卓・矢内利政 (2012) 野球のバッテ
ィングにおける打球の運動エネルギーを決定するス
ィングとインパクト. バイオメカニクス研究,
16(4): 220-230.
- 小池関也 (2010) 力覚検出型センサーバットの開発.
機能材料, 30(8): 13-17.
- 小池関也・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.
- 小池関也・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”.
- 倉林 準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心
推定方法の比較・検討. バイオメカニクス学会誌,
27(1): 29-35.
- 前田正登 (2001) 野球におけるバットのスィングの再
現性に関する研究. スポーツ方法学研究, 14(1): 1-
11.

- 宮西智久 (2004) 野球の打撃動作の角運動量解析. 第18回バイオメカニクス学会大会論集, 160-161.
- 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・藤井範久・阿江通良・功刀靖雄・岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹のおよび投球腕の力学的エネルギー・フローに関する3次元解析. 体力科学, 46(1): 55-68.
- 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.
- 森下義隆・平野裕一・矢内利政 (2013) 野球のバッティングにおけるバットヘッド速度に対する体幹および上肢のキネマティクスの貢献. バイオメカニクス研究, 17(4): 170-180.
- 村田宗紀・藤井範久 (2014) 下肢および胴部に着目した硬式テニスサーブにおけるボール回転の打ち分け. バイオメカニズム22. 慶応義塾大学出版, pp. 155-166.
- 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, pp. 38-39.
- 西井哲夫 (2006) 野球技術—打撃編—. 舵社, pp. 5-69.
- 及川 研・大沼 徹・平野裕一 (1996) 野球のバットの軌道及びそれに影響する打撃動作の類型化の試み. スポーツ方法学研究, 9(1): 127-139.
- Sawicki, G. S., Hubbard, M., and Stronge, W. J. (2003) How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories. *Am. J. Phys.*, 71(11): 1152-1162.
- 島田一志・阿江通良・藤井範久・川村 卓・高橋佳三 (2004) 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. バイオメカニクス研究, 8(1): 12-26.
- 島田一志・阿江通良・藤井範久・結城匡啓・川村 卓 (2000) 野球のピッチング動作における体幹および下肢の役割に関するバイオメカニクスの研究. バイオメカニクス研究, 4(1): 47-60.
- Tabuchi, N., Matsuo, T., Hashizume K. (2007) Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. *Sport Biomech.*, 6(1): 17-30.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・高橋佳三・川村 卓 (2006a) 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.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・川村 卓 (2006b) 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.
- 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 (2010) 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.
- 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.

(平成27年5月13日受付)
(平成27年9月18日受理)