

野球の打撃動作における打撃条件の違いが上肢のキネマティクスに 及ぼす影響：ティーおよび飛来球打撃条件による比較

阿江 数通¹⁾ 小池 関也²⁾ 藤井 範久²⁾
阿江 通良³⁾ 川村 卓²⁾ 金堀 哲也²⁾

Kazumichi Ae¹, Sekiya Koike², Norihisa Fujii², Michiyoshi Ae³, Takashi Kawamura² and Tetsuya Kanahori²: Effect of upper limb kinematics during baseball motion under different hitting conditions: Comparison between baseball tee and pitched ball batting. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 62: 559-574, December, 2017

Abstract : The purpose of this study was to compare the kinematic characteristics of the upper body between baseball tee batting and pitched ball batting in order to gain basic knowledge for improvement of batting skill. Ten male collegiate baseball players (age: 20.7 ± 1.1 yr; height: 1.75 ± 0.05 m; body mass: 76.3 ± 7.1 kg; athletic career: 12.7 ± 2.7 yr) participated. They performed 2 kinds of batting: tee batting (TB) and machine-pitch batting (MB) using a pitching machine (approximate ball speed 33.3 m/s), which were set at middle ball height for the strike zone. Three-dimensional coordinate data were acquired with a motion capture system. Kinematic variables such as maximum bat-head speed, swing time, bat angle, joint angles of the upper limbs, and segment angle of the upper trunk were calculated. Differences between TB and MB were analyzed statistically using paired *t*-test ($p < 0.05$). The maximum bat-head speed was significantly greater in TB than in MB, but swing times divided into 2 phases showed no significant differences between MB and TB. In the first half of the swing, the bat inclination angle was significantly larger in MB than in TB. The joint angles of the barrel-side shoulder abduction, knob-side shoulder adduction and internal rotation were significantly larger in MB than in TB, and those of the barrel-side shoulder internal rotation and individual elbow pronations were significantly larger in TB than in MB. The clockwise rotational angle of the upper trunk was significantly larger in TB than in MB. In the last half of the swing, the joint angles of the barrel-side shoulder abduction, knob-side shoulder flexion and adduction were significantly larger in MB than in TB, and that of the knob-side elbow pronation was significantly larger in TB than in MB. The changes in upper body movement in MB affected the radius of rotation of the bat about the vertical axis to control the bat easily. The movements in the last half of the swing largely resulted from those in the first half of the swing, and did not contribute to timing adjustment. These results indicate that the initial configuration of the bat and upper limbs, and movements at the beginning of the bat swing contribute to the timing adjustment of the bat for a pitched ball. The results of the present study suggest that it could be useful to pay attention to the movement of the bat and upper body in the first half of the swing as TB practice in order to improve timing adjustment.

Key words : stationary batting, pitching machine, joint angle

キーワード : 静止球打撃, ピッチングマシン, 関節角度

- 1) 筑波大学スポーツ R&D コア
〒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
 - 3) 日本体育大学体育学部
〒158-8508 東京都世田谷区深沢 7-1-1
- 連絡先 阿江数通

1. *Sports Research & Development Core, 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
 3. *Faculty of Sport Science, Nippon Sport Science University*
7-1-1, Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo 158-8508
- Corresponding author ae.kazumichi.gn@u.tsukuba.ac.jp

1. 緒 言

野球の打撃動作では、打者は時間的な拘束条件が伴う投球されたボールに対して、コースを予測して適切にタイミング調整を行いながらボールを打撃する必要がある。この際、バット・ヘッドスピードをより大きくしてボールを打撃することができれば、ホームランといった長打を打てる可能性が高まる。しかしながら、これらの運動課題は、非常に短い時間のうちに達成されなければならないことから、数多くあるスポーツ動作の中でも野球打撃は複雑な動作の1つとされている(DeRenne et al., 2008; Race, 1960)。

これまでに野球の打撃動作に関するバイオメカニクスの研究では、バットあるいは上半身のキネマティクスに関する研究が数多く報告されている(Escamilla et al., 2009a, 2009b; 平野, 1984; 川村ほか, 2000, 2001; 城所ほか, 2011, 2012; Tabuchi et al., 2007)。しかしながら、これら多くの先行研究においても、上肢の各関節運動、とりわけ肩関節の屈曲伸展、内外転、および内外旋運動といった各関節の運動自由度を考慮した研究は少ない傾向にある(川村ほか, 2008; McIntyre and Pfausch, 1982; 田子ほか, 2006a, 2006b; 谷中ほか, 2014)。得られた知見を動作改善といった打撃技術の向上に繋げるためには、上肢各関節の運動自由度を考慮することが必要であると考えられる。

ボールを正確に打撃することに大きく寄与する重要な運動課題の1つであるタイミング調整に関する研究について、発光ダイオード光などによってボールが打者に向かって飛来することを模擬した装置を用いたもの(工藤, 1987; Matsuo and Kasai, 1994; Matsuo et al., 1993; 太田・中本, 2015)、投手あるいはピッチングマシンによる投球速度を変化させたものなどがある(Fortenbaugh et al., 2011; Hirano, 1985; Katsumata, 2007; 勝又・川合, 1996; 高木ほか, 2008, 2010a, 2010b)。高木ほか(2008, 2010a, 2010b)は、大学野球選手を対象として異なる

3つの速度(低速, 中速, 高速)に対する下肢および体幹の動きについて検討した。その結果から、高速なボールへの対応には、主に左右股関節トルクの発揮タイミングを調整し、打撃方向への身体重心の並進運動を制限すること、および体幹の回転動作を調整することが有効であると報告している。Fortenbaugh et al. (2011)は、プロ野球選手を対象として異なる2つの速度(速球, チェンジアップ)に対する地面反力の違いについて検討した。その結果、ステップ脚側の鉛直および水平成分の最大値の出現タイミングに差がみられたことを報告している。このように、タイミング調整に寄与する下肢および体幹に関する知見は明らかにされているものの、上肢の関節運動に関する知見は明らかとなっていない。

野球の打撃動作に関する研究の実験条件について、投手による投球あるいはピッチングマシンを用いた飛来球打撃、およびティー台を用いた静止球打撃の主に2種類が報告されている。飛来球打撃では、飛来するボールに対して打者はタイミング調整を行う必要があることから、時間的拘束が伴う実際のスウィング動作に近いデータが計測可能となる。しかしながら、ボールコースは投手およびピッチングマシンの精度に大きく依存することから、打者が打撃するボール位置には大きな誤差が生じる(Tabuchi et al., 2007)。これに対して、静止球打撃では、打者のタイミング調整に寄与する動作は無視されることになるものの、ボールコースを同一にすることができるため研究目的に応じたデータが正確に計測可能となる。ここでティー打撃については、スウィング動作の確認、不得意なコースの克服などといった打撃技術の向上、およびボールを上手く打撃することができない幼少年や未熟練者に対して頻繁に用いられる練習法の1つである。これらのことから、ティー打撃と飛来球打撃における動作の違いを明らかにすることは、ティー打撃練習の利点、飛来球を打撃することに有効となるティー打撃練習法の提供などといった、野球の打撃技術の向上に繋がる知見を得ることができると考えられる。しかしながら、これまでの先行研究では、両打撃におい

てボールコース条件を一定にすることが困難であったと推測される。このため、同一の被験者群における両打撃条件を比較した研究は少なく、川端・伊藤（2012）は、両打撃条件におけるバットの動きについて検討を行っているものの、バット操作を担う上肢の関節運動については言及していない。

そこで本研究では、ティー打撃およびピッチングマシンを用いた飛来球打撃における上半身のキネマティクスの特徴を明らかにすることによって、打撃技術の向上に関する基礎的な知見を得ることを目的とした。両打撃条件下におけるキネマティクスの差、すなわちバットのタイミング調整に寄与する上肢各関節および上腕の動作を明らかにすることは、タイミング調整技術の向上、練習目的に応じたティー打撃法の示唆などといった打撃指導の着眼点を得ることができると考えられる。

2. 方 法

2.1. 被験者およびデータ収集

首都大学1部リーグに所属する硬式野球部の野手10名（年齢：20.7±1.1歳，身長：1.75±0.05 m，体質量：76.3±7.1 kg，競技歴：12.7±2.7年，右打6名，左打4名）を被験者とした。実験試技では、ボール高さを真中に設定した、ティー台を用いた静止球打撃となるティー打撃（以下「TB」と略す）およびピッチングマシン（ニッシンエスピーエム社製，SMA30）を用いた飛来球打撃となるマシン打撃（以下「MB」と略す）をそれぞれ行った。MBでは、先行研究を参考にしてボールスピードをおよそ120 km/hに設定にした（Escamilla et al., 2009a, 2009b；Katsumata, 2007）。両打撃ともに被験者にはセンター方向にライナー性の打球を可能な限り力強く打撃するように指示をした。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、被験者が打撃姿勢をとった際のベルト位置を真中と定義した。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、協力への同意を得てから実験を行った。なお、本研究は当該大学研究倫理委員会の承認を得ている。

各試技の計測については、阿江ほか（2013）および Suzuki et al.（2014）を参考にして、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 Motion Systems社製，VICON-MX，カメラ16台，250 Hz）を用いて、各マーカーの3次元座標を計測した（Fig. 1）。

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以上となる最も点数の高かった1試技（成功試技）を対象とした。各被験者ともに3から5回程度試技を行った。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 low-pass digital filter を用いて平滑化処理を行った。なお、本研究では、後述するようにボールインパクトの衝撃が座標値に影響を及ぼさない範囲（後述するスウィング開始からボールインパクト）を分析対象としていることから、座標値に対して特別な平滑化処理は行っていない。

2.3. 算出項目および算出方法

2.3.1. 基礎的パラメーター

本研究では、両打撃条件において被験者が同一のボール位置を打撃しているかを評価するため、ステップ足が地面に接地した時点における軸足の爪先と、ボールインパクト時におけるバットのボール打撃部位との距離（XおよびY成分）を算出した。すなわち、同距離は、被験者内の軸足の爪先に対するバットのボール打撃部位の相対位置となる。軸足の爪先位置については、両打撃条件において各被験者が常に同じ位置から打撃を行うように予めマークをしていることから基準点として利用可能であると考えられる。身体重心や肩関節点を基準点とした場合、仮に各距離に差がな

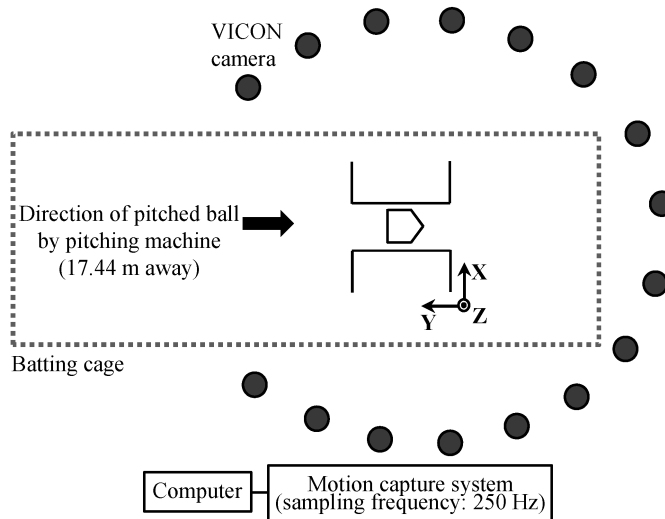


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

かったとしてもこれらの基準点は各試技ごとに变化することから、各打撃条件のボール位置を評価することが難しいと考えられる。バットのボール打撃部位については、本研究の実験データから直接バットのボール打撃部位を取得することは困難であることから、長さ 0.84 m のバットのバット・ヘッドマーカーからグリップエンド方向に 0.15 m 内挿した位置をボール打撃部位と定義した。鉛直高 (Z 成分) については、ボールインパクト時におけるバットのボール打撃部位の鉛直成分の値を用いた。さらに 3 軸の合成距離についても算出した。

加えて、打撃パフォーマンスを示す基礎的パラメータとしてスウィング時間を算出した。スウィング開始から骨盤ベクトル (右打者の場合: 左股関節から右股関節) が XY 平面において $-Y$ 軸と一致する時点までを第 1 局面、その時点以降からボールインパクトまでを第 2 局面と定義した。

2.3.2. バットのヘッドスピード、傾斜および水平面の角度

バット・ヘッドスピードについては、バット・ヘッドマーカーの 3 次元座標値を時間微分することによりバット・ヘッド速度ベクトルを算出

し、その大きさの最大値と定義した。加えて、バットの回転運動 (水平および鉛直) を評価するために 2 つのバット角度を算出した。バット傾斜角度については、バット長軸と静止座標系の水平面とのなす角とした。バットのヘッド位置がグリップエンド部より上方に位置した場合を正值 (バットが起きた状態) とし、ヘッド位置がグリップエンド部より下方に位置した場合を負値 (バットが倒れた状態) と定義した。バット水平面の角度については、バット長軸を静止座標系の水平面内に投影し、同ベクトルと $-Y$ 軸とのなす角とした。 $-Y$ 軸に対して反時計まわり (打撃方向) を正值とし、時計まわり (捕手方向) を負値と定義した。

2.3.3. 上肢の関節角度および上腕のセグメント角度の定義

本研究では、バレル側 (バット・ヘッド側) およびノブ側 (グリップエンド側) の上肢をそれぞれ手、前腕および上腕からなる剛体リンクとしてモデル化した。3 次元動作を評価するために、阿江ほか (2014) を参考にして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、各関節座標系から関節角度を算出した。肩関節の角度については、屈曲伸展 (伸展: 正, 屈曲:

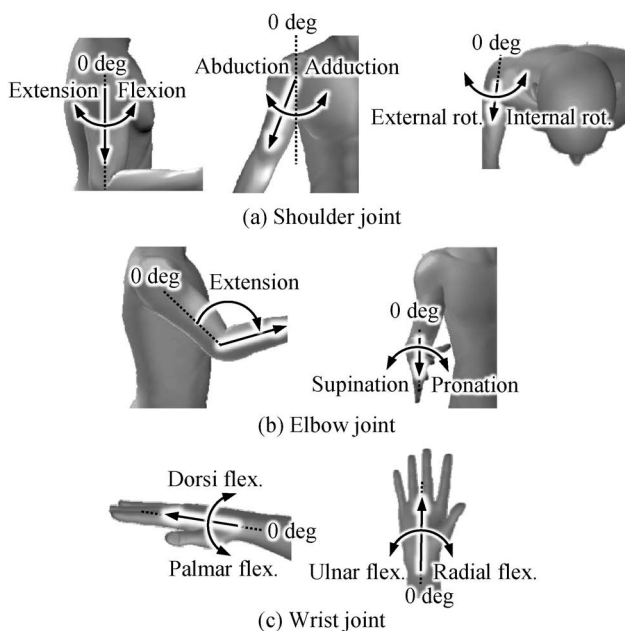


Fig. 2 Definitions of the upper limb joint angle.

負), 内外転(外転:正, 内転:負), および内外旋(外旋:正, 内旋:負)の3自由度とした(Fig. 2 (a)). 肘関節の角度については, 屈曲伸展(伸展:正, 屈曲:負), および回内外(回外:正, 回内:負)の2自由度とした(Fig. 2 (b)). 手関節の角度については, 掌背屈(背屈:正, 掌屈:負), および橈尺屈(橈屈:正, 尺屈:負)の2自由度とした(Fig. 2 (c)). なお, 本研究では前腕の回内外を肘関節の運動に含めて定義した.

加えて, 静止座標系に対する上腕のセグメント角度を算出した. 阿江ほか(2015)と同様に上腕のセグメント座標系を設定し, 前後傾(後傾:正, 前傾:負), 左右側屈(右側屈:正, 左側屈:負), および左右回旋(左回旋:正, 右回旋:負)の3自由度の角度とした.

2.3.4. 標準動作モデルの作成

本研究では, Ae et al. (2007)の方法を参考にして, 左右上肢の3次元な運動を考慮したTBおよびMBにおける標準動作モデルを作成した. まず身体各部分(47点)の3次元座標値か

ら阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体重心を算出した. つぎに身体各部分に加えて, バット・ヘッドおよびバット姿勢を用いて得たグリップエンドの計49点の3次元座標値を, 身体重心点に対する相対座標値へと座標変換した. 最後に相対座標値を被験者の身長によって除した後, 平均をした.

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, スウィング開始(川村ほか, 2008)からボールインパクトの衝撃によって座標値が歪むことを考慮して, ボールインパクトの1コマ前までを対象とし, 本研究では同時点をボールインパクト(以下「インパクト」と略す)と定義した.

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.

統計処理については、各算出項目における TB と MB の有意差の要因に対して、算出項目に対応のある t 検定を適用して、有意水準 5% の検定を行った。特に時系列データの場合には、規格化時間の 1% 毎に検定を行った。

3. 結 果

3.1. 基礎的パラメーター

Table 1 に、軸足の爪先とバットのボール打撃部位との距離 (X および Y 成分)、鉛直高 (Z 成分) および合成距離、バット・ヘッドスピード、ならびにスウィング時間を示す。バット・ヘッドスピードでは、TB が MB よりも有意に大きかった。

Table 1 Basic parameters for tee-batting and machine-pitch batting.

	TB	MB	
Distance [m]			
X axis	0.715 ± 0.067	0.716 ± 0.061	n.s.
Y axis	0.822 ± 0.059	0.855 ± 0.082	n.s.
Z axis	0.827 ± 0.042	0.780 ± 0.099	n.s.
Norm	1.354 ± 0.053	1.352 ± 0.103	n.s.
Bat-head speed [m/s]	37.4 ± 1.35	36.4 ± 1.19	*
Swing time [s]			
Phase-1	0.090 ± 0.028	0.068 ± 0.028	n.s.
Phase-2	0.125 ± 0.011	0.137 ± 0.017	n.s.

*: significant n.s.: not significant

た。スウィング時間では、第 2 局面が第 1 局面よりも時間が長くなる傾向にあったものの、いずれも MB と TB との間に有意な差はみられなかった。

3.2. バットのキネマティクス

Fig. 3 に、バットの傾斜および水平面の角度を示す (実線: TB, 点線: MB, ○: 有意差)。なお、各データは全被験者の値を平均したものである。傾斜角度 (a) は、0% から 40% 付近にかけて MB が TB よりも有意に正值が大きく、その後 55% から 80% 付近にかけて TB が MB よりも有意に正值が、80% から 90% 付近にかけては MB が TB よりも有意に負値がそれぞれ大きかった。インパクト時点においては、TB では -23.3 度、MB では -24.0 度であった。水平面角度 (b) は、0% から 60% 付近にかけて TB が MB よりも有意に負値が大きかった。インパクト時点においては、TB では 90.3 度、MB では 86.8 度であった。

3.3. 上半身のキネマティクス

3.3.1. バレル側上肢

Fig. 4 に、バレル側上肢の関節角度を示す (実線: TB, 点線: MB, ○: 有意差)。上段 (a), (b), (c) が肩関節を、中段 (d), (e) が肘関節を、下段 (f), (g) が手関節をそれぞれ示している。肩関節について、屈曲伸展軸 (a) では、主に 0% から 40% 付近にかけて TB が MB よりも

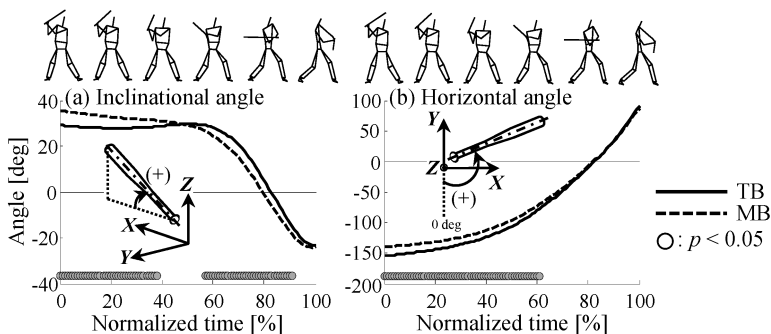


Fig. 3 Time histories of averaged inclinational and horizontal angles (solid line: tee-batting, dashed line: machine-batting).

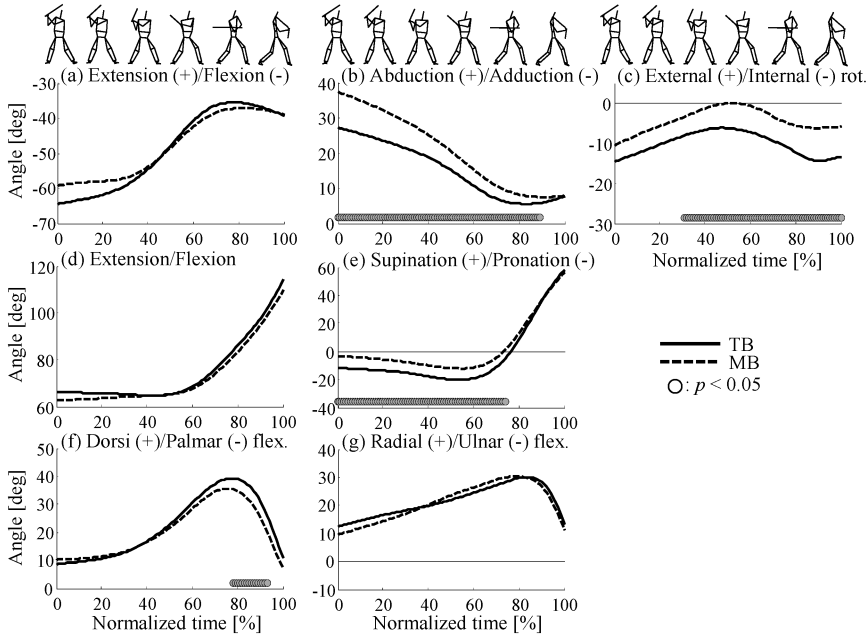


Fig. 4 Time histories of averaged joint angle for the barrel-side upper limb (solid line: tee-batting, dashed line: machine-batting). (a), (b), (c): shoulder joint (top), (d), (e): elbow joint (middle), (f), (g): wrist joint (bottom).

屈曲角が大きくなる傾向がみられたものの、TBとMBとの間に有意な差はみられなかった。内外転軸 (b) では、0%から90%にかけてMBがTBよりも有意に外転角が大きかった。内外旋軸 (c) では、30%から100%にかけてTBがMBよりも有意に内旋角が大きかった。肘関節について、屈曲伸展軸 (d) では、主に0%から35%付近にかけてTBがMBよりも伸展角が大きくなる傾向がみられたものの、TBとMBとの間に有意な差はみられなかった。回内外軸 (e) では、0%から75%付近にかけてTBがMBよりも有意に回内角が大きかった。手関節について、掌背屈軸 (f) では、75%から95%付近にかけてTBがMBよりも有意に背屈角が大きかった。橈尺屈軸 (g) では、TBとMBとの間に有意な差はみられなかった。

3.3.2. ノブ側上肢

Fig. 5に、ノブ側上肢の関節角度を示す。図の仕様はFig. 4と同様である。肩関節について、

屈曲伸展軸 (a) では、25%から85%付近にかけてMBがTBよりも有意に屈曲角が大きかった。内外転軸 (b) では、0%から100%にかけてMBがTBよりも有意に内転角が大きかった。内外旋軸 (c) では、0%から55%付近にかけてMBがTBよりも有意に内旋角が大きかった。肘関節について、屈曲伸展軸 (d) では、0%からMBがTBよりも伸展角が大きくなる傾向がみられたものの、TBとMBとの間に有意な差はみられなかった。回内外軸 (e) では、0%から65%付近、および80%付近以降においてTBがMBよりも有意に回内角が大きかった。手関節について、掌背屈軸 (f) では、35%から70%付近にかけてTBがMBよりも有意に背屈角が大きく、その後70%から80%付近にかけてはMBがTBよりも有意に掌屈角が大きかった。橈尺屈軸 (g) では、バレル側手関節の橈尺屈軸と同様にTBとMBとの間に有意な差はみられなかった。

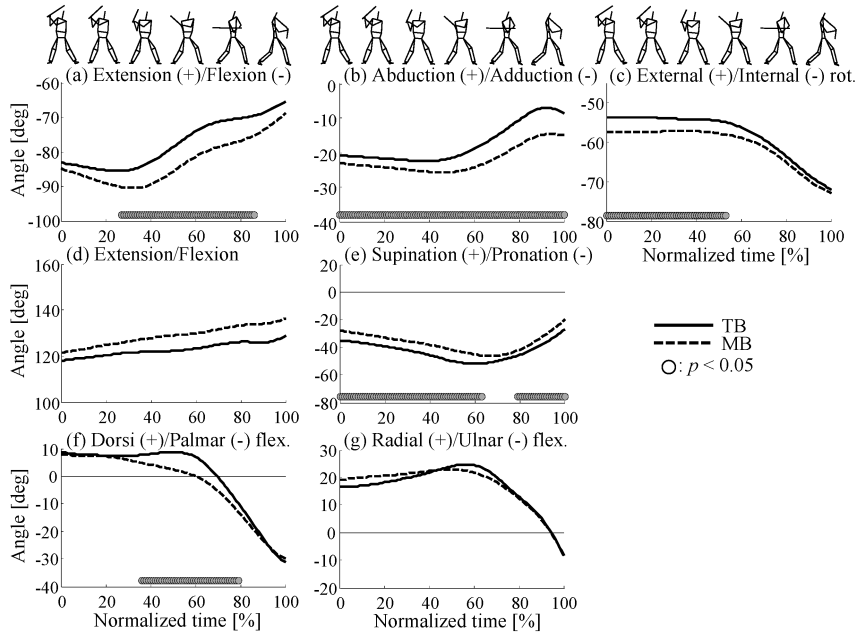


Fig. 5 Time histories of averaged joint angle for the knob-side upper limb (solid line: tee-batting, dashed line: machine-batting). (a), (b), (c): shoulder joint (top), (d), (e): elbow joint (middle), (f), (g): wrist joint (bottom).

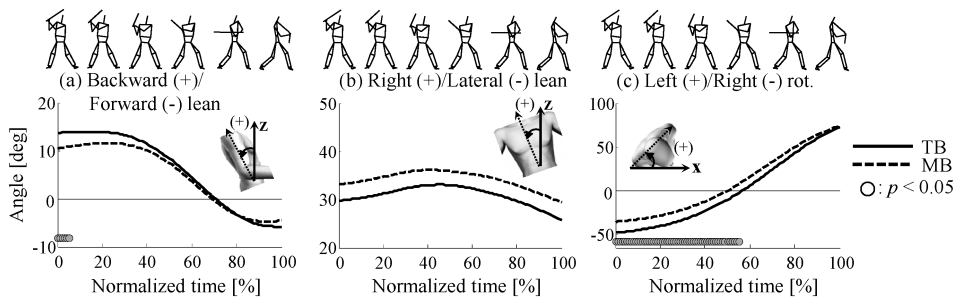


Fig. 6 Time histories of averaged segment angle of the upper trunk (solid line: tee-batting, dashed line: machine-batting).

3.3.3. 上脛セグメント

Fig. 6に、上脛のセグメント角度を示す。図の仕様はFig. 4と同様である。前後傾軸(a)では、0%から5%付近にかけてTBがMBよりも有意に後傾角が大きかった。(b)左右側屈軸では、0%からMBがTBよりも右側屈角が大きくなる傾向がみられたものの、TBとMBとの間に有意な差はみられなかった。(c)左右回旋軸では、0%から55%付近にかけてTBがMBよりも有意に右回旋角が大きかった。

4. 考 察

4.1. 実験条件の妥当性

本研究では、ティー打撃(静止球)とマシン打撃(飛来球)を分析対象としている。このため、両打撃条件を比較するにあたり、まず被験者が両打撃条件下において同位置のボールを打撃していたか否かを評価する必要があると考えられる。バットのボール打撃部位について、先行研究ではバ

ット・ヘッドから 0.102 から 0.203 m の位置にボール打撃部位が存在すると報告されている (阿江ほか, 2013; Bryant et al., 1977; Crisco et al., 2002; 城所ほか, 2011, 2012; 城所・矢内, 2015; Nathan, 2003). そこでバットのボール打撃部位の違いが TB と MB とのボール打撃位置に及ぼす影響について, インパクト時点における平均バット傾斜および水平角度の TB と MB の差分 (0.7度, 3.5度), ならびに本研究のボール打撃部位と先行研究の差分 (0.05 m) をもとに, 正弦および余弦定理から検討した. その結果, X 成分距離は 0.0499 m, Y 軸成分距離は 0.0031 m, 鉛直高は 0.0006 m となり, いずれの値も爪先とバットのボール打撃部位との距離の標準偏差よりも小さかった (Table 1). 以上のことから, 本研究において仮定したバットのボール打撃部位が TB と MB のボール打撃位置の統計結果に及ぼす影響は小さいと考えられる.

Table 1 の結果が示すように, 各距離においても TB と MB との間には有意な差はみられず, 本研究の被験者は TB と MB においてほぼ同位置のボールを打撃していたといえる. したがって, 以降に示す各パラメータにおける TB と MB との差は, バットの鉛直変位や左右変位といった異なるボール位置に対する上肢の関節運動の調整に起因するものではなく, ボールを打撃するためのタイミング調整を行うことに起因するものと考えられる.

4.2. ティーおよびマシン打撃における上半身運動の違い

スウィング時間の第 1 および第 2 局面においては, TB と MB との間に有意な差がみられなかった (Table 1). このため, 本章ではスウィング開始からインパクトまでの分析範囲をスウィング前半 (規格化時間 0—50%) およびスウィング後半 (規格化時間 50—100%) とに分けて, ティーおよびマシン打撃条件の違いが上肢の関節運動に及ぼす影響をバットの動きと合わせて述べていく.

4.2.1. スウィング前半局面

スウィング前半において, 左右ともに肩関節の内外転角および内旋角, ならびに肘関節の回内角は TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 4 (b), (c), (e), Fig. 5 (b), (c), (e)). 各関節角度の時系列変化を考慮すると, これらの角度差にはスウィング開始時点における TB と MB との差が大きく影響していたと考えられる. 田子ほか (2006a, 2006b) は, 両肩関節の内外転運動はバットの打撃方向への引き出しに寄与することを報告し, 川村ほか (2008) は, ノブ側肩関節の内転および水平内転動作は指導現場における脇をしめる動作に相当することを報告している. 川村ほかの報告における肩関節の水平内転運動は, 本研究における肩関節の内旋動作に相当すると考えられる. これに対して阿江ほか (2014) は, バットが起きている状態では両肩関節の屈曲伸展トルクがバットの鉛直下方への変位に大きく寄与することを報告している. これらのことから, TB と MB との打撃条件の違いとなるバットのタイミング調整には, 肩関節の内外転および内旋運動によるバットの水平変位が大きく寄与すると考えられる. バット角度についてみると, スウィング開始時点におけるバットの傾斜角度は, TB では 29.2度, MB では 35.5度, バットの水平面角度は, TB では -154.3度, MB では -139.7度を示し, MB が TB よりもバットが上方に起き, また打撃方向へと振り出された状態となっていた (Fig. 3). このことは Fig. 7 に示した標準動作モデルのバットの姿勢からもわかるだろう. Escamilla et al. (2009a) および川端と伊藤 (2012) は, バットを短く持つことによって慣性モーメントが小さくなり, バットの回転が容易になることを報告している. 上腕の運動について, 右回旋角 (0—50%) において TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 6 (c)). 高木ほか (2008) は, 鉛直軸まわりの上腕の回転動作の範囲を小さくすることは打撃の正確性を高めることに繋がると報告している. したがって, よりバットが上方に起きた状態からスウィングを開始することは, 飛来球に対応するための鉛直軸まわりに

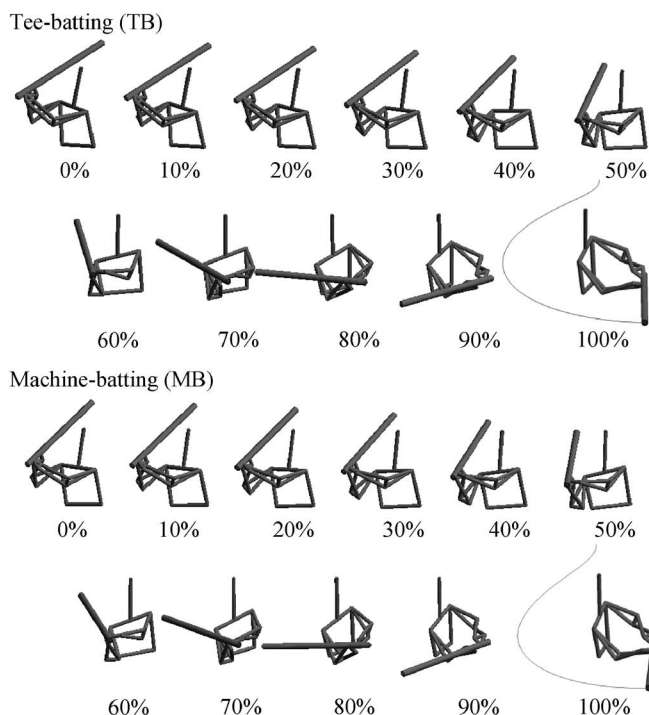


Fig. 7 Standard motion of the upper trunk and bat during the instant of beginning of the bat swing to the ball impact ($n=10$).

おけるバットの回転半径を小さくし、バットの操作性を向上させること、すなわち鉛直軸まわりの身体に対するバットの慣性モーメントを小さくすることに有効であると推察される。上肢関節の運動に加えて、上胴の運動においても予め鉛直軸まわりの運動である右回旋角を小さくし、スウィング前半における右回旋から左回旋への角変位を小さくすることが飛来球への対応に有効であると考えられる。

両肘関節の回内角について、上胴が右回旋位にあり (Fig. 6 (c)), また比較的バットが上方に起きた状態にあるスウィング前半では (Fig. 7), 手関節角度が変化しないとした仮定した場合、前腕の長軸まわりの運動となる肘関節の回内は、主に打撃方向へのバットの傾斜角度の変化に寄与することとなる。また野球の打撃動作の先行研究において回内外運動に言及したものは少ないものの、そのうちのキネティクスに関する研究では、本研究と同様な局面において発揮される回外トル

クは他の運動軸のトルクよりも顕著に小さく、トルクパワーも小さくなることが報告されている (阿江ほか, 2014; 小池ほか, 2003)。したがって、肘関節の回内運動では、主にスウィング開始時点においてバットの姿勢変化に及ぼす影響は大きくなるのに対して、スウィング開始以降においては上述した肩関節運動よりもスウィングに及ぼす影響は小さくなると推察される。また上胴の後傾角については、TB と MB との間に有意な差がみられたものの (Fig. 6 (a)), 阿江ほか (2015) は、体幹仮想関節の前後屈トルクは主に上胴の姿勢を維持することに寄与し、前後屈運動がバット運動に及ぼす影響は小さくなると報告している。これらのことを考慮すると、上胴の後傾運動は両肘関節の回内運動と同様に飛来球への対応に大きくは寄与しないと推察される。

加えて、ノブ側肩関節の屈曲角 (25—50%), および手関節の背屈角 (35—50%) においても TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 5

(a), (f)). 川村ほか (2008) は, バット・ヘッドスピードが大きい上位群は下位群よりも脇を閉める動作が顕著であったこと, 雑巾を絞るようにノブ側手関節の背屈角を大きくする意識は脇を締める動作に繋がることを報告している. この際, 川村ほかはノブ側肩関節の外転運動の役割に言及しているのに対して, 田子ほか (2006b) は, ノブ側肩関節の屈曲角を小さくすることが脇を締める動作になることを示唆している. これらのことを考慮すると, TB が MB よりもノブ側肩関節の屈曲角および外転角を小さくすること, さらには TB と MB との間に顕著な差がみられたノブ側手関節の背屈角を大きくすることは, TB が MB よりもバット・ヘッドスピードの増大に繋がる脇を締める動作を行っていたと考えられる. この理由として, TB ではボール位置が予めわかっていることからタイミングの調整を行ってボールを打撃するという運動課題を考慮する必要が低くなることが考えられる. したがって, 本研究ではバット・ヘッドスピードにおいて TB が MB よりも有意に大きくなり (Table 1), TB は MB よりもバット・ヘッドスピードの増大に繋がるような動作を行っていたと推察される.

4.2.2. スウィング後半局面

上述したようにスウィング前半においては, 主に両肩関節の内外転角および内旋角, 両肘関節の回内角, ならびに上腕の右回旋角がバット運動の変化に寄与していた. スウィング後半においても両肩関節の内外転角, および肘関節の回内角において TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 4 (b), (e), Fig. 5 (b), (e)). 加えて, バレル側肩関節の内旋角, ノブ側肩関節の屈曲角においても TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 4 (c), Fig. 5 (a)). 標準動作モデルをみてもわかるように, インパクトが近づくにつれてバットは地面と平行に近くなる軌道, すなわちバットは打撃方向へと押し出され, 指導現場におけるレベル・スウィングのバット軌道となっていた (Fig. 7). ノブ側肩関節の屈曲角について, 上述したように川村ほか (2008) および田子ほ

か (2006b) は, バット・ヘッドスピードを増大させるために同運動は脇を締める動作に寄与することを報告している. これらの報告およびバット軌道を考慮すると, ノブ側肩関節の屈曲運動を含めたこれらの関節運動は, スウィング後半においてもその役割はスウィング前半と大きくは変わらず, 主にバットの水平変位に寄与すると考えられる.

しかしながら, 60%以降においてバットの水平面角度には TB と MB との間に有意な差がみられなかった (Fig. 3 (b)). 加えて, バットの傾斜角度において TB と MB との間に有意な差がみられたものの (55—90%, Fig. 3 (a)), この差にはスウィング前半の角度差が影響を及ぼしていたことを考慮すると, バットの動きを示すバット角速度 (角度の傾き) には TB と MB との間に大きな差はみられなかった. Matsuo and Kasai (1994) は, ボールリリース後およそ0.3秒付近から投球に対するバットのタイミング調整が行われ, インパクトが近づくにつれてバットの動きのばらつきは小さくなることを報告している. また石田ほか (2000) は, 最大努力下のスウィングにおいてインパクト前0.077秒から0.157秒までバット運動の調整が可能であることを報告している. 本研究におけるスウィング後半 (50—100%) は, インパクト前およそ0.1秒からインパクトまでに相当することとなる. したがって, スウィング時間 (第2局面) において TB と MB との間に有意な差がみられなかったことからわかるように (Table 1), スウィング後半において, 同位置のボールを正確に打撃することができた場合, TB と MB のバット軌道に大きな差は生じないと考えられる. 特にスウィング開始時点の TB と MB との角度差に影響を及ぼされていない, 両肩関節の内外転, ノブ側肩関節の屈曲および肘関節の回内運動は, スウィング開始以降において TB と MB のバット軌道を結果的にほぼ同様にさせることに寄与していたと考えられる. その一方で, 上述したインパクト付近では顕著にバット操作は行われないという先行研究の結果 (Matsuo and Kasai, 1994; 石田ほか, 2000) を

考慮すると、バットのタイミング調整に対して大きくは寄与していないと推察される。ここで阿江ほか (2014) および小池ほか (2003, 2006) は、バット・ヘッドスピード生成に起因する遠心力の増大に伴って左右の上肢関節トルクも大きくなることを報告している。これらのことから、特にインパクトが近づくにつれて、上述した TB と MB との間に有意な差がみられた各関節運動は、タイミング調整に寄与するというよりは、水平変位のうちのバット・ヘッドスピードの生成に寄与していたことが本研究の結果からも示唆される。

スウィング前半から引き続き、TB と MB との間に有意な差がみられた肩および肘関節に対して、手関節では、バレル側手関節の背屈角 (75—95%)、ならびにノブ側手関節の背屈角 (50—70%)、および掌屈角 (70—80%) において TB と MB との間に有意な差がみられた (Fig. 4 (f), Fig. 5 (f))。バットの加速に対して、川村ほか (2001, 2008) は、手関節では主に橈尺屈動作が寄与すること、阿江ほか (2014) は、左右の手関節の掌背屈および橈尺屈トルクが寄与することを報告している。上腕の運動について、スウィング後半において左回旋角へと切り替わり、TB と MB との間に有意な差はみられなかった (Fig. 6 (c))。多くの先行研究において鉛直軸まわりの上腕あるいは体幹部の運動は、バット・ヘッドスピードの生成に寄与することが報告されている (川村ほか, 2012; 森下ほか, 2013; 田内ほか, 2005; Welch et al., 1995)。また阿江ほか (2015) は、異なる打点高におけるバット・ヘッドスピードの差に対して、体幹仮想関節の左右回旋トルクの及ぼす影響は小さくなることを報告している。したがって、手関節では上述した肩関節運動と同様にスウィング開始時点の角度差に影響を及ぼされていないことを考慮すると、手関節および上腕の左回旋の運動についても TB と MB のバット軌道をほぼ同様にさせることに寄与し、打撃条件に関わらず基礎的なバット・ヘッドスピードを生成する役割を担っていると推察される。

両局面ともに TB と MB との間に有意な差がみられなかった両肘関節の屈曲伸展運動につい

て、バレル側では、特にインパクト付近において屈曲伸展運動がバット・ヘッドスピードの生成に大きく寄与すると報告されている (阿江ほか, 2014; 川村ほか, 2008; 田子ほか, 2006a)。これに対して、ノブ側では、いくつかの先行研究において肘関節の屈曲伸展運動がバットの操作に大きく寄与することが報告されており (Escamilla et al., 2009a, 2009b; 平野, 1984; McIntyre and Pfautsch, 1982; 田子ほか, 2006a), また Welch et al. (1995) は、スウィング中では同関節の屈曲伸展角が維持されること、川村ほか (2008) は、その角変位が小さいことからバットの加速に対して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、両肘関節の屈曲伸展運動については、打撃条件に関わらずスウィング動作に及ぼす影響は大きくなるかと推察されるものの、本研究の結果からその役割を具体的に言及することは難しいと考えられる。また、同様に TB と MB との間に有意な差がみられなかった上腕の右側屈運動については、上腕の左右回旋運動と比較して、その角変位が顕著に小さかったことから、バットおよび上肢関節運動に及ぼす影響、ならびに飛来球に対応するためのタイミング調整への寄与は小さくなると推察される。

4.3. 指導への示唆および今後の研究課題

ティー打撃と飛来球打撃のキネマティクスを比較した本研究の結果から、以下に述べる打撃指導の着眼点および指導への示唆を導き出せるだろう。

飛来球を打撃するための技術の向上について、バットおよび上半身の初期姿勢、ならびにスウィング前半の動作に着目することが有効であると示唆される。スウィング前半において左右の肩関節の内外転および内旋、肘関節の回内といった上肢関節の運動、ならびに上腕の右回旋から左回旋への運動において TB と MB との間に顕著な差がみられ、これらの運動は主にバットのタイミング調整に寄与すると考えられる。その際、これらの上半身の運動における TB と MB との初期角度の差が、そのままスウィング開始以降にみられた TB と MB との角度の差となっていた。したがっ

て、ティー打撃練習において、スウィング開始時点におけるバットおよび上半身の姿勢、そしてスウィング前半の動作を改善することは、飛来球を打撃するための打撃技術の向上に繋がるのが本研究の結果より示唆される。特に初期姿勢の改善については、スウィング開始以降の動作を変化させることに比べてバットに大きな遠心力が作用していないことから容易であり、打撃技術を大きく向上あるいは改善させられる可能性があると考えられる。加えてスウィング後半では、打撃条件に関わらずバット軌道を大きく変化させることができないこと、また特に両肩関節の屈曲伸展運動はバットのタイミング調整に大きく寄与しないことが明らかとなった。したがって、ティー打撃練習は、下半身主導によってスウィング動作が開始された後、スウィング後半における両肩関節の屈曲伸展運動などの上肢関節、および上腕の動作を向上させることに特化した練習にも活用できると示唆されるだろう。その一方で、TB ではティー台によってボールが支えられていることから、打者はティー台を打撃しないように無意識のうちにバット軌道およびスウィング動作を変化させている可能性もある。この点は、TB と MB とを比較した本研究の限界となるだろう。

最後に、今後の研究課題について、打撃技術の向上に繋がる具体的な知見を提示できること、およびある特定の関節運動に絞った研究を行うことが必要であると示唆される。例えばある選手の打撃動作を改善させるために、本研究において得られた各関節の初期角度や角度変化などの具体的な数値を提示する際には、TB および MB の打撃条件という研究の限界があること、いずれも平均値であることなどの考慮が必要であると考えられる。このため、シミュレーション分析やトレーニング実験といった事例研究などを行うことによって、得られた知見の有効性を検証していく必要性が示唆される。加えて、肘関節の屈曲伸展運動について、特にノブ側では、いくつかの先行研究において様々な報告がなされている（阿江ほか、2014；Escamilla et al., 2009a, 2009b；平野、1984；川村ほか、2008；Mcintyre and Pfautsch,

1982；田子ほか、2006a；Welch et al., 1995）。このように、ノブ側肘関節の屈曲伸展運動については、被験者あるいは実験条件などの違いによって見解に相違がみられていることから、打撃技術あるいは個人の差が顕著に表われやすいと推察される。したがって、肘関節の運動を詳細に検討することは、今後、野球の打撃動作に関する新たな知見の獲得に繋がるものと示唆される。

5. 結 論

本研究の目的は、ティー打撃 (TB) およびピッチングマシンを用いた飛来球打撃 (MB) における上半身のキネマティクスの分析を行うことによって、バットのタイミング調整に寄与する上肢各関節および上腕の動作を考慮した上で指導への示唆に繋がる基礎的な知見を得ることであった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① バット・ヘッドスピードの最大値、スウィング開始からインパクトまでを2つの局面に分けたスウィング時間には、TB と MB との間に有意な差はみられなかった。
- ② バットの傾斜角度では、主にスウィング前半においてMB がTB よりも有意に上方への角度が大きかった。バットの水平面角度では、スウィング前半においてMB がTB よりもバットと-Y軸（捕手方向）とのなす角が有意に小さく、MB がTB よりもバットが振り出されていた。
- ③ 左右の肩関節の内外転角および内旋角、ならびに肘関節の回内角において、スウィング開始時点におけるTB とMB との角度の差が、それ以降の角度変化に対して大きな影響を及ぼしていた。
- ④ スウィング前半において、左右の肩関節の内外転角ならびにノブ側（グリップエンド側）肩関節の内旋角は、MB がTB よりも有意に大きかったのに対して、パレル側（バット・ヘッド側）肩関節の内旋角ならびに両肘関節の回内角は、TB がMB よりも有意に大きかった。

- ⑤ スウィング後半において、左右の肩関節の内転、ノブ側肩関節の屈曲は、MBがTBよりも有意に大きく、またノブ側肘関節の回内角はTBがMBよりも有意に大きかった。
- ⑥ スウィング前半において、時計まわり（捕手方向）の鉛直軸まわりの回転となる上脛セグメントの右回旋角は、TBがMBよりも有意に大きかった。

以上のことから、飛来球を打撃するためのバットのタイミング調整に対して、主に左右の肩関節の内転および内旋、肘関節の回内、ならびに上脛の右回旋動作が寄与すると考えられる。スウィング前半では、これらの動作を変化させてバットをより鉛直上方に起こし、バットの回転半径を小さくすることがバットの操作性の向上に寄与すると考えられる。これに対してスウィング後半では、これらの動作はスウィング前半と同様にバットの水平変位に寄与するものの、タイミング調整に対して大きくは寄与しないと考えられる。したがって、ティー打撃練習では、スウィング開始時点におけるバットおよび上半身の姿勢、そしてスウィング前半の動作に留意することは、飛来球を打撃するための打撃技術の向上を目的とした際に有効であることが本研究の結果より示唆される。

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ック的分析. *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ック的分析. *体育学研究*, 59(2): 431-452.
- 阿江数通・小池関也・川村卓 (2015) 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ック的分析. *体育学研究*, 60(2): 635-649.
- 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.
- Ae, M., Muraki, Y., Koyama, H., and Fujii, N. (2007) A biomechanical method to establish a standard motion and identify critical motion by motion variability: With examples of high jump and sprint running. *Bulletin of institute of health and sport sciences, University of Tsukuba*, 30: 5-12.
- Bryant, F. O., Burkett, L. N., Chen, S. S., Krahenbuhl, G. S., and Lu, P. (1977) Dynamic and performance characteristics of baseball bats. *Res. Q.* 48(3): 505-509.
- Crisco, J. J., Greenwald, R. M., Blume, J. D., and Penna, L. H. (2002) Batting performance of wood and metal baseball bats. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34(10): 1675-1684.
- DeRenne, C., Morgan, C. F., Hetzler, R. K., and Taura, B. T. (2008) National and state youth baseball coaching requirements (A state case study). *Sport Journal*, 11: 1-17.
- 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. *Sport. Biomech.*, 10(4): 270-279.
- 平野裕一 (1984) バットによる打の動作. *J. J. Sports Sci.*, 3(3): 199-208.
- Hirano, Y. (1985) An analysis of timing in softball hitting. The proceedings of the Department of Physical Education, College of General Education, University of Tokyo, 19: 1-8.
- 石田和之・仲井良平・平野裕一 (2000) 野球打者の打撃の意思決定とバットの運動調整に関する実験的研究. *バイオメカニクス研究*, 4(3): 172-178.
- Katsumata, H. (2007) A functional modulation for timing a movement: A coordinative structure in baseball batting. *Hum. Movement Sci.*, 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.
- 川端浩一・伊藤章 (2012) グリップ位置と投球速度の違いが野球のバットスウィングに及ぼす影響. *体育学研究*, 57(2): 557-565.
- 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ウ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ウィング特性. 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ウィングとインパクト. バイオメカニクス研究, 16(4): 220-230.
- 城所収二・矢内利政 (2015) 野球における『流し打ち』を可能にするもう一つのインパクトメカニズム. 体育学研究, 60(1): 103-115.
- 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”.
- 工藤孝幾 (1987) バッティング動作におけるタイミングの分析. 体育学研究, 31(4): 285-292.
- Matsuo, T. and Kasai, T. (1994) Timing strategy of baseball-batting. *J. Hum. Movement Stud.*, 27: 253-269.
- Matsuo, T., Kasai, T., and Asami, T. (1993) The improvement of coincidence anticipation timing task with bat-swing. *J. Hum. Movement Stud.*, 25: 99-119.
- Mcintyre, D. R. and Pfautsch, 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.
- 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.
- Nathan, A. (2003) Characterizing the performance of baseball bats. *Am. J. Phys.* 71(2): 134-143.
- 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.
- 太田洋一・中本浩揮 (2015) バットグリップ位置の変化が野球の打撃タイミングと床反力および筋活動に与える影響. 体育学研究, 60(2): 527-537.
- Race, D. E. (1960) A cinematographic and mechanical analysis of the external movements involved in hitting a baseball effectively. *Res. Q.*, 32(3): 394-404.
- Suzuki, Y., Ae, M., Takenaka, S., and Fujii, N. (2014) Comparison of support leg kinetics between side-step and cross-step cutting techniques. *Sport. Biomech.*, 13(2): 144-153.
- Tabuchi, N., Matsuo, T., and 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. バイオメカニクス学会誌, 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. バイオメカニクス学会誌, 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マティクスの研究. バイオメカニクス学会誌, 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.

谷中拓哉・城所収二・近田彰治・矢内利政（2014）野球のバッティングにおけるバットのローリング発生メカニズム. *バイオメカニクス研究*, 18(2): 53–62.

（2016年9月23日受付）
（2017年7月10日受理）

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2017/9/1