

野球の打撃における上肢のエネルギーフロー ：バット・ヘッドスピードの上位群と下位群のスイング局面の比較

川村 卓¹⁾ 小池 関也¹⁾ 阿江 数通²⁾

Takashi Kawamura¹, Sekiya Koike¹ and Kazumichi Ae²: Comparison of upper limb motion energy flow between high and low bat head speed groups in baseball. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

Abstract: This study examined the flow of energy in the right and left upper limbs of skilled baseball batters during the forward swing motion at different bat head speeds to obtain basic insights that would be useful for batting coaching. The subjects were 23 college baseball outfielders in university teams. The subjects were instructed to hit a ball toward the pitcher from a tee set at a mid-height position. Measurements were taken using 47 points on each subject's body and 6 points on the bat for a total of 53 points, onto which reflective markers were attached. The 3D coordinates of each marker were measured using a 3D optical motion capture device (Vicon Motion Systems' VICONMX, 12 cameras, 250 Hz). The variables in the kinetics of each hand were measured using a force detection sensor bat (1000 Hz). The subjects were separated into a faster group of 36.8 ± 0.8 m/s and a slower group of 34.7 ± 1.1 m/s for analysis. In terms of energy transmission, the data revealed that the faster group, in addition to showing additional torque on the knob side shoulder joints, were able to transmit more mechanical energy from the knob side shoulder joints to the end of the upper limbs than the slower group, and that this might be related to an efficient bat head speed. In addition, the faster group showed an increased positive torque power, and transmitted greater mechanical energy to the bat from the hand region. In other words, to prevent mechanical energy from being absorbed while adjusting the bat trajectory near the time of impact, skilled bat control involving movement of the hand joints appeared to determine the bat head speed.

Key words : sensor bat, kinetics, batting, motion capture, closed loop

キーワード：センサーバット、キネティクス、バッティング、モーションキャプチャー、閉ループ

I 緒 言

野球における打撃の課題は、投手の投球に対して速い打球を打つこと、飛距離を出すこと、狙いとする方向へ正確に打つことに大別される。そのため、大きな衝撃力と打球の大きな初速度を得るために、打者はバットのスイング速度を大きくすることが重要であると考えられる。スイング速度を大きくするために求められる動作とは下肢、体幹によって生み出された運動量をバットに伝えることである。宮西（2006）は下肢、腰、肩の角運

動量を算出し、下肢からバットへ順次運動量が転移していくことを報告している。その他にも田内ほか（2005）や高木ほか（2008）によって、全身を使ってバットに作用させるまでの巧みな動作が重要であることが報告されている。一方で、浅見（1984）は打撃する位置をどのように作るかにおいて上肢の動きが最も重要な役割を果たすと述べている。バットは両上肢によって保持されるが、その役割は左右において異なるとされている。指導書においてもトップハンド側の腕を「プッシュ」として使い、ボトムハンド側の腕を「バットのリード」として使うのが良いと述べられている（Gola

1) 筑波大学体育系

〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

2) 茨城県立医療大学保健医療学部理学療法学科

〒300-0394 茨城県稲敷郡阿見町阿見 4669-2

連絡先 川村卓

1. Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

2. Department of Physical Therapy, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences

4669-2 Ami, Ami-machi, Inashiki-gun, Ibaraki 300-0394

Corresponding author kawamura.takashi.jp@u.tsukuba.ac.jp

and Monteleone, 2001) が、これらの多くは指導者や選手の個人的経験の域を出ていない。上肢において近位にある肩関節から末端にある手関節へと加速していく動作は「運動連鎖」と呼ばれ、投球、テニスのサービスなどで報告されている(村田ほか, 2015; 島田ほか, 2004)。野球の打撃動作も上肢の末端にあるバットを加速させていくことで運動連鎖を行っていると考えられるが、両上肢によってバットが保持されることから複雑な動作と力の発揮があることが推察される。運動連鎖に関して、松尾(2011)は「Energetics は運動連鎖をよく表現している」と述べており、打撃動作を力学的エネルギーの面から明らかにすることは、動作の解明そして指導するための知見を得ることにおいて大変意義があると考えられる。

しかし、両上肢によってバットが保持される野球の打撃において、逆動力学計算によって各関節のキネティクス量を算出するためには、バットおよび上肢により構成される閉ループ系があるために、一意的に解が定まらない問題を解決する必要がある。その問題解決のために小池(2010)は左右各手への力の作用力および作用モーメントの計測を行える力検出型センサー・バットを開発した。このセンサー・バットを使って野球の打撃の左右各手および上肢のキネティクスに関する報告がなされている(阿江ほか, 2013, 2014; 小池, 2010)。この左右各手の作用力および作用モーメントの計測から左右各上肢のエネルギーの流れを算出することが可能となり、これにより野球の打撃における運動連鎖のメカニズムの解明ができると考えられる。

さらに川村ほか(2008)は指導現場で有用な研究にするには動作の運動経過全体に着目してパフォーマンスを向上させる要因を検討する必要があると述べている。そのためにはスイング速度の大小、つまり運動経験が豊富であるにもかかわらず動作の巧拙がある熟練者間について、運動経過に沿って時系列で比較することによって指導における着眼点を導き出すことができると考えられる。

本研究の目的は、熟練野球選手の打撃動作におけるフォワードスイング局面の左右上肢の力学的

エネルギーの流れを明らかにすると共に、バット・ヘッドスピードの異なる被験者の動作を比較することにより打撃指導に関する基礎的知見を得ることである。

II 方法

1. 被験者およびデータ収集

大学1部リーグに所属する硬式野球部の熟練野手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、被験者にボール高さを真中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。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。

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, 以下「VICON」と略す)を用いて、各マーカートの3次元座標を計測した。

左右各手のキネティクスの変量の計測には、小池(2010)が開発した力検出型センサー・バットを用いた(1000 Hz)。なお、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。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. 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数が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。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 low-pass 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。

3. 算出項目および算出方法

3.1 上肢の関節座標系および関節角変位の定義

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。3 次元動作を評価するために、阿江ほか（2014）と同様に、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、各関節座標系から関節角変位を算出した。

肩関節の角変位については、屈曲伸展（伸展：正，屈曲：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。

肘関節および橈尺関節角変位については、それぞれ屈曲伸展（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。

手関節の角変位については、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。

3.2 上肢関節のキネティクスの変量

本研究では、上肢関節のキネティクスの変量として、まずセンサー・バットから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、各関節に作用する力およびモーメント，すなわち関節力および関節トルクを算出した。そして、この関節力および関節トルクを用いて、関節力パワー，関節トルクパワー，セグメントトルクパワー，および力学的仕事を算出した。

左右の上肢関節 k, j (k = バレル側，ノブ側； j = 手，肘，肩) における関節力 $F_{k,j}$ および関節トルク $T_{k,j}$ から，関節力パワー $P_{JF,k,j}$ ，関節トルクパワー $P_{JT,k,j}$ ，およびセグメントトルクパワー $P_{ST,k,j}$ が，以下の式により求まる。

$$P_{JF,k,j} = F_{k,j} \cdot V_{k,j} \quad (1)$$

$$P_{JT,k,j} = T_{k,j} \cdot w_{k,j} \quad (2)$$

$$P_{ST,k,j} = T_{k,j} \cdot w_{k,i} \quad (3)$$

ここで， $F_{k,j}$ は関節に作用する関節力， $T_{k,j}$ は関節が発揮する関節トルク， $V_{k,j}$ は関節の速度， $w_{k,j}$ は関節の角速度， $w_{k,i}$ はセグメント i (i = 手，前腕，上腕) 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，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（以下「仕事」と略す）を算出した。

なお，各セグメントの角速度ベクトル $w_{k,i}$ については，セグメント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求めた。そして，各関節の角速度 $w_{k,j}$ については，隣接するセグメント角速度ベクトルの相対角速度 ($w_{k,j-1} - w_{k,j}$) として求めた。

3.3 群間の選定

本研究では，川村ほか（2008）を参考にして，バット・ヘッドスピードを競技力の優劣を示す評価指標と定義して全被験者を 2 群に分けた。全被験者 23 名におけるバット・ヘッドスピードの最大値における平均値を算出し，平均値よりも値が大きかった 12 名を上位群（High），平均値よりも値が小さかった 11 名を下位群（Low）とした。

3.4 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）の定義に従い，バット・ヘッドスピードとグリップスピードの和が 3 m/s を超えた時点から平滑化処理を行う前までのバット・ヘッドスピードが急激に減少する 1 コマ前の時点（以下「インパクト」と略す）までとして，この区間をフォワード・スイング局面とした（Fig.1）。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，スイ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

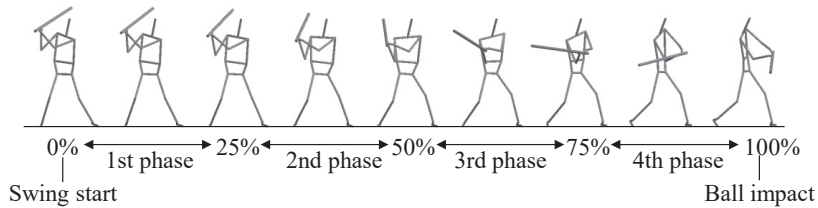


Fig. 1 Definition of the individual phases in forward swing batting motion.

た。また、各局面毎の上肢関節トルクによる仕事を評価するために、規格化時間の25%毎に4つの局面を設けた。

統計処理については、各測定項目について両群間の比較を行うため、対応のない t 検定を用いた。時系列データに関しては、川村ほか(2008)および高橋ほか(2005)と同様に、まず繰り返しのある二元配置分散分析を行い、群間の主効果および交互作用(群間 \times 経時変化)について有意差検定を行った。つぎに群間において有意差がみられる時点の特定のために規格化時間の1%時ごとに t 検定を行った。本研究は二元配置分散分析において交互作用が有意であることが、時刻ごとの t 検定(単純主効果の検定)を行うことの前提となる。このため、二元配置分散分析の結果については交互作用の有意差の有無を記述することとした。なお、これらの有意水準は5%未満とした。

III 結 果

1. 左右上肢の力学的エネルギーの流れ

1.1 関節力パワー

フォワード・スイング局面における左右上肢に関する関節力パワーをFig.2に示す。同図の左列がバレル側上肢のパワーを、右列がノブ側上肢のパワーを示し、上段(a), (d)が上腕、中段(b), (e)が前腕、そして下段(c), (f)が手の値をそれぞれ示している(近位側:黒色, 遠位側:灰色;上位群:実線, 下位群:点線)。そして、正值は各セグメントへの力学的エネルギーの流入を、負値は各セグメントからの力学的エネルギーの流出を示す。また、群間において有意差がみられた時点には記号(○)を示している(近位側:上段, 遠

位側:下段)。

まずバレル側上肢について、上腕部(a)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用(群間 \times 経時変化)はみられず、近位側および遠位側ともに値は小さかった。前腕部(b)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、70%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値はともに増大していた。手部(c)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、60%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値はともに増大していた。

次にノブ側上肢について、上腕部(d)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、30%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値ともに、上位群が下位群よりも顕著に大きかった。前腕部(e)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、35%付近以降において近位側の正值が、および70%付近以降において遠位側の負値が、ともに上位群が下位群よりも顕著に大きかった。手部(f)では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、80%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値ともに上位群が下位群よりも顕著に大きかった。

1.2 セグメントトルクパワー

フォワード・スイング局面における左右上肢に関するセグメントトルクパワーをFig.3に示す。図の仕様はFig.2と同様である。まずバレル側上肢について、上腕部(a)では、近位側において有意な交互作用はみられなかったが、遠位側においては有意な交互作用がみられた($p < 0.05$)。

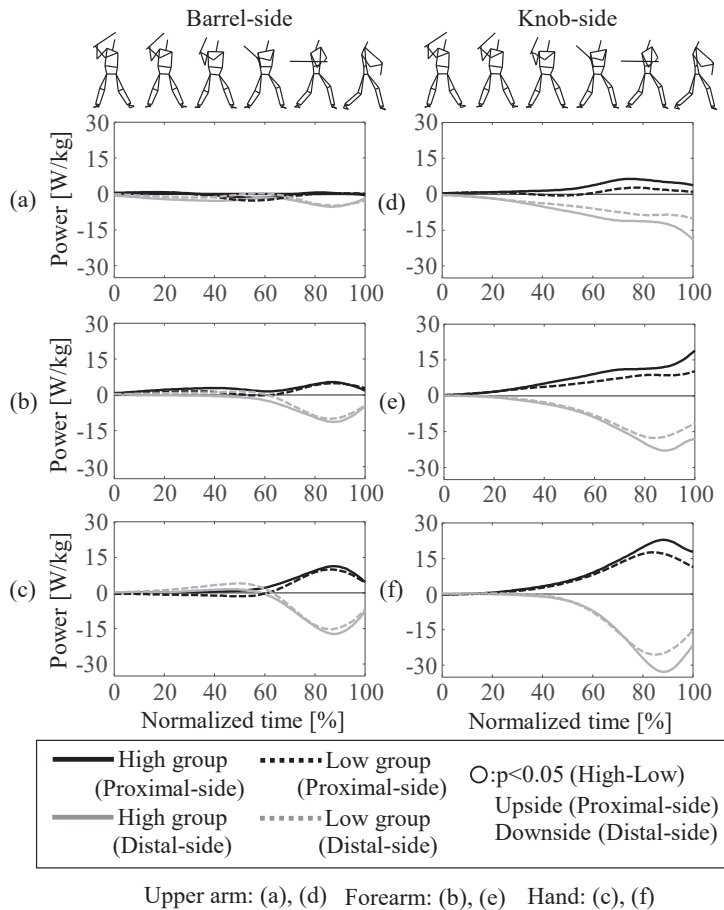


Fig. 2 The mechanical energy flow done by the joint force power of the individual upper limbs in the forward swing motion.

スイング開始から近位側において正值および遠位側において負値がみられ、10%から20%付近および50%から60%付近にかけて遠位側の負値に有意な差がみられた ($p < 0.05$)。前腕部 (b) では、50%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値ともに顕著に値が増大していた。近位側および遠位側ともに有意な交互作用がみられ ($p < 0.05$)、特に60%付近からインパクトにかけて上位群が下位群より大きく、主に60%から75%付近にかけて近位側の正值に、60%から90%付近にかけ遠位側の負値にそれぞれ有意な差がみられた ($p < 0.05$)。手部 (c) では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用がみられ ($p < 0.05$)、スイング開始から50%付近において値はほとんどみられないものの、遠位側において有

意な差がみられた ($p < 0.05$)。その後60%付近以降においては近位側および遠位側ともに値がみられ、主に60%以降にかけて近位側および遠位側ともに有意な差がみられた ($p < 0.05$)。

つぎにノブ側上肢について、上腕部 (d) では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、特に80%付近以降において近位側の正值および遠位側の負値ともに上位群が下位群より大きかった。前腕部 (e) では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、上腕部と同様に、近位側において正值および遠位側において負値がみられた。手部 (f) では、近位側および遠位側ともに有意な交互作用はみられなかったが、近位側において50%付近以降からインパクトにかけて値がみられた。遠位側

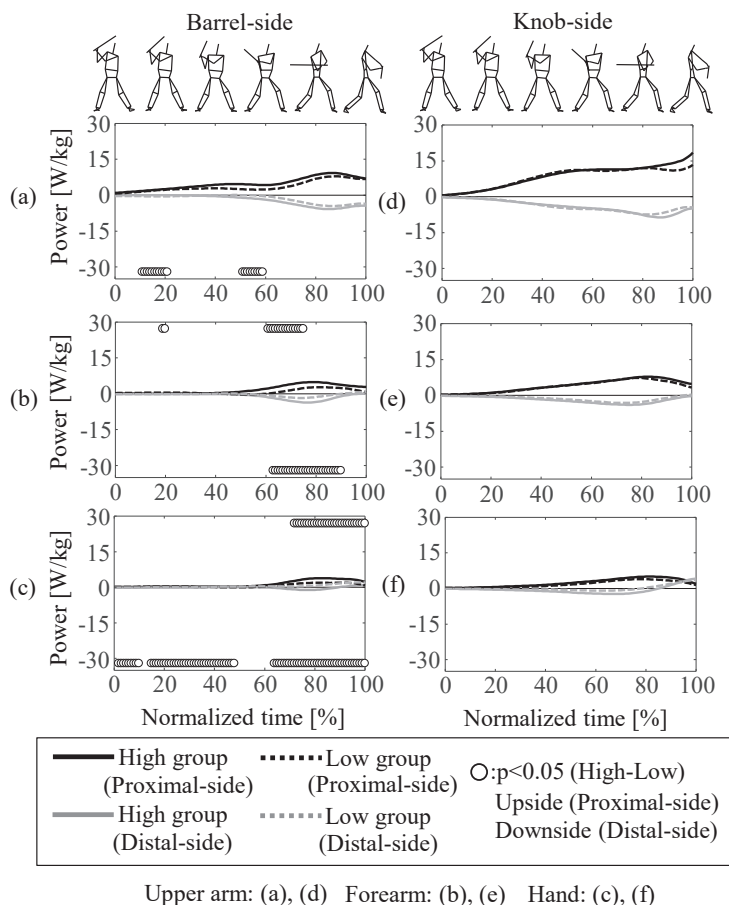


Fig. 3 The mechanical energy flow done by the segment torque power of the individual upper limbs in the forward swing motion.

においては、80% 付近以降において上位および下位群ともに負値から正値へと値が切り替わっていた。

1.3 左右上肢の関節トルクによる力学的仕事

Fig.4 に、左右上肢の各関節トルクによる仕事を局面毎に正負に分けて示す。各仕事は左右の上肢毎に、肩関節、肘関節、手関節の順に示している（上位群：灰色、下位群：白色）。なお本研究では、各関節における力学的エネルギーの発生および吸収を定量化するために、各関節トルクによる仕事の各運動軸まわりの値を合計したものを示している。

まずバレル側上肢について、第1局面 (a) では、ほぼ肩関節の正仕事のみがみられたものの、

その値は小さく、群間の差もみられなかった。第2局面 (b) では、第1局面と同様に、肩関節の正仕事のみが顕著にみられ、上位群が下位群よりも大きくなる傾向がみられた。第3局面 (c) では、肩関節において上位群が下位群よりも正仕事が大きく、肘および手関節においては主に負仕事のみがみられたものの、いずれも群間による有意な差はみられなかった。第4局面 (d) では、肩関節において上位群が下位群よりも有意に正仕事が大きく ($p < 0.05$)、肘関節においては下位群が上位群よりも負仕事が大きくなる傾向がみられ、手関節においては上位群が下位群よりも有意に正仕事が大きかった ($p < 0.05$)。

つぎにノブ側上肢について、第1局面 (e) では、主に肩関節において下位群が上位群よりも負

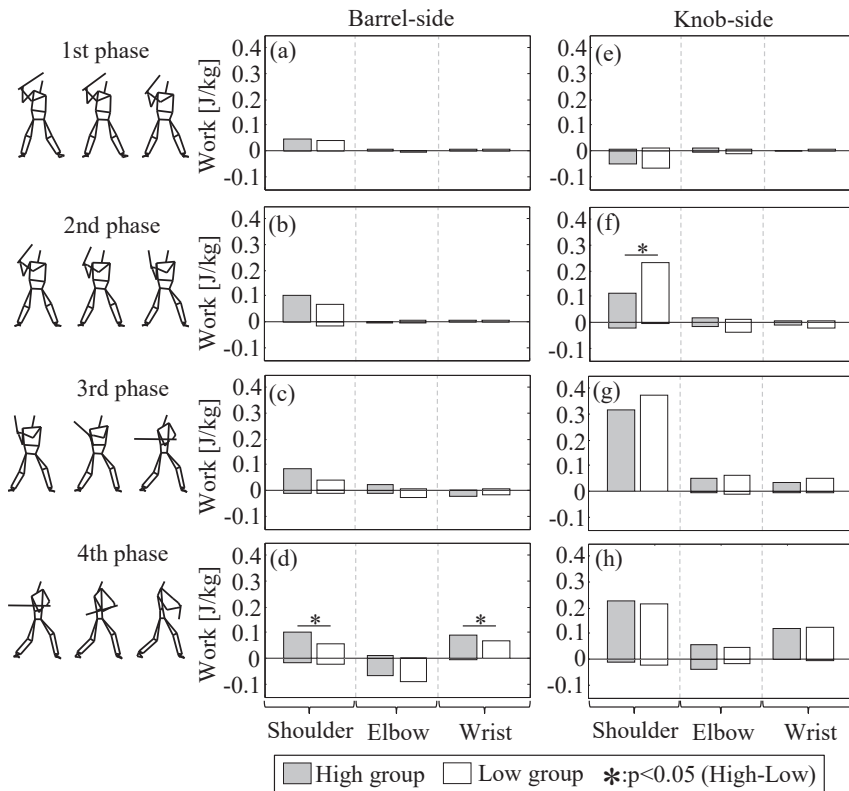


Fig. 4 The mechanical work done by the joint torque of the individual upper limbs for each phase.

仕事が大きくなる傾向がみられた。第2局面 (f) では、肩関節において下位群が上位群よりも正仕事が有意に大きく ($p < 0.05$)、肘および手関節においては負仕事がみられたものの、その値は小さかった。第3局面 (g) では、肩関節において下位群が上位群よりも正仕事が大きくなる傾向がみられ、肘および手関節においては正仕事がみられたものの、それぞれ群間による顕著な差はみられなかった。第4局面 (h) では、肩関節において正仕事が大きかったものの、群間による顕著な差はみられなかった。肘関節においては正および負仕事はみられ、特に負仕事において上位群が下位群よりも大きくなる傾向がみられた。手関節においては正仕事が大きかったものの、群間による顕著な差はみられなかった。

IV 考 察

本章では、まず上位群と下位群において共通し

た力学的エネルギーの流れに着目することによって、野球の打撃動作における上肢の力学的エネルギーの流れの特徴を明らかにする。つぎに上位群と下位群における力学的エネルギーの流れの相違を明らかにすることによって、打撃指導への示唆を得ることとする。

1. 上位群と下位群に共通の力学的エネルギーの流れ

1.1 スイング前半 (第1および第2局面)

バレル側上肢では、ノブ側上肢と比べて関節力パワーおよびセグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの顕著な流入出はみられなかった (Fig.2 (a), (b), (c), Fig.3 (a), (b), (c)). この結果は、島田ほか (2004) を参考にして作成した Fig.5 の局面毎に示した力学的エネルギーの流れの模式図からも理解できるだろう。川村ほか (2008) は、スイング開始直後ではバレル側上肢に関して肘関節を屈曲したまま肩関節の各運動軸

において角度変化がみられたと報告している。したがって、バレル側上肢では、スイング開始から50%にかけて主に肩関節による動作が行われることから、上肢末端への顕著な力学的エネルギーの伝達がみられなかったと考えられる。加えて阿江ほか（2014）は、スイング開始からバレル側肩関節は内転トルクおよび正のトルクパワーを発揮して、指導現場におけるインサイド・アウトのスイングを行うために脇を締める動作を行っている」と報告している。このため、同局面におけるバレル側上肢の働きは、バットが遠回りした軌道、いわゆるドア・スイングにならないようにバットを身体付近に留めておくという補助的なものであると考えられる。

ノブ側上肢では、セグメントトルクパワーにおいて主に上腕部および前腕部に顕著な近位からの力学的エネルギーの流入および遠位への流出がみられ（Fig.3 (d), (e), (f)）、関節力パワーにおいては、上腕部では遠位への力学的エネルギーの流出が、前腕部では近位からの流入および遠位への流出がみられた（Fig.2 (d), (e), (f)）。このようにバレル側上肢に比べてノブ側上肢では、Fig.5 (a) からわかるようにスイング開始から

関節力およびセグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流れの顕著な差が本研究の結果から明らかとなった。小池ほか（2003）は、ノブ側上肢では各関節において顕著な関節トルクによる正仕事が行われたことから、ノブ側の上肢関節はバットを前方へ引き出すことに貢献することを報告している。したがって、スイング開始からノブ側の肩、肘および手関節において顕著なトルク発揮を行うことは、ノブ側上肢において近位から遠位へと力学的エネルギーを効率良く流すことにもなり、この作用によりバットは前方へと大きく加速されると考えられる。またノブ側上肢では、特に関節力パワーによる上腕部の遠位への力学的エネルギーの流出および前腕部の流入出が大きかった。平島・大築（2005）、内藤・丸山（2007）、および小池ほか（2009）は、野球の投球動作やテニスのサーブ動作といった高速スイング動作における上肢末端のスピード獲得に対して、遠心力やコリオリ力といった回転運動に起因する力による貢献、いわゆる運動連鎖や運動依存による貢献が大きくなることを報告している。したがって、野球の打撃動作においても特に大きなトルク発揮が可能であるノブ側の肩関節運動によって大きな関節

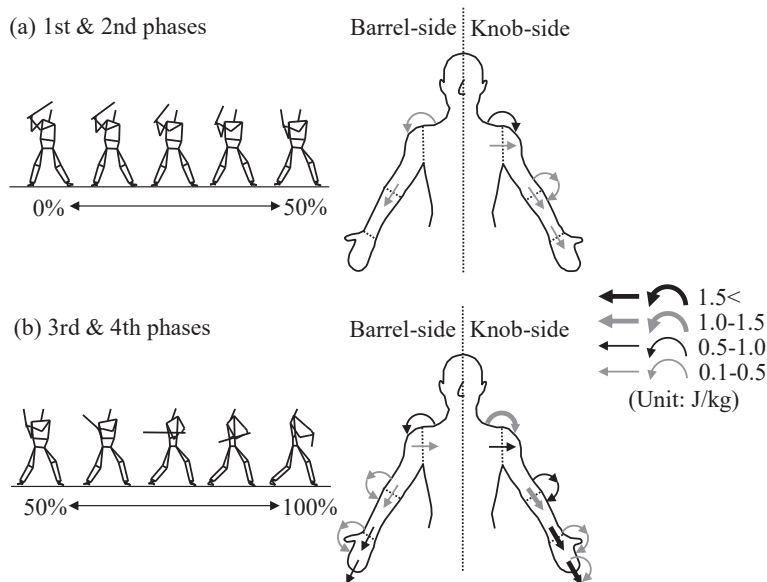


Fig. 5 Diagram of mechanical energy flow done by the segment torque power and joint force power of the individual upper limbs in the forward swing motion.

力が生成され、また上肢末端へと伝達されることが本研究の結果より明らかとなった。

1.2 スイング後半（第3および第4局面）

バレル側上肢では、セグメントトルクパワーにおいて上腕部および前腕部の近位からの力学的エネルギーの流入および遠位への流出、ならびに手部の近位からの流入がみられ、手部においては、上位群では遠位への流出、下位群では遠位からの流入がみられた (Fig.3 (a), (b), (c)). 小池ほか (2003, 2006) は、インパクト付近ではバレル側の上肢関節トルクおよびその仕事が大きくなることを報告している。本研究においても第3および第4局面では、第1および第2局面よりもバレル側の肘および手関節トルクによる仕事が大きくなる傾向がみられ (Fig.4 (c), (d)), スイング後半ではスイング前半よりも上肢の近位から遠位への顕著な力学的エネルギーの流れがみられた (Fig.5 (b)). したがって、インパクト付近では各関節のトルク発揮が大きくなることによって、セグメントトルクパワーによる上肢末端への力学的エネルギーの伝達量も大きくなったと考えられる。また、関節力パワーにおいては、スイング前半よりも上腕部の遠位への力学的エネルギーの流出、ならびに前腕部、手部の近位からの流入および遠位への流出が大きかった (Fig.2 (a), (b), (c), Fig.5 (b)). 川村ほか (2008) は、バレル側上肢では体幹から遠位となる肘および手関節がバット・ヘッドの加速に寄与することを示唆している。阿江ほか (2014) は、インパクト付近ではバレル側の肘および手関節トルクがバットの水平変位の獲得、すなわちバット・ヘッドスピードの増大に寄与することを報告している。したがって、スイング後半となる50%からインパクトにおいて、セグメントトルクパワーに加えて関節力パワーによる力学的エネルギーが上肢末端へと伝達されることは、スイング前半と同様にバットを打撃方向へと押し出しバット・ヘッドスピードを増大させることに有効であると考えられる。その一方で、手部のセグメントトルクパワーにおいては特にインパクト直前では遠位からの流入がみられ (Fig.3 (c)),

また第4局面における肘関節トルクによる仕事においては顕著な負仕事がみられた (Fig.4 (d)). 伊藤ほか (2001) は、関節トルクによる仕事の負値はバットの調整に寄与し、小池ほか (2003, 2006) は、左右上肢のうち、主にバレル側上肢において負仕事が多い傾向にあることを報告している。これらの点を考慮すると、インパクト直前においてボールをミートするために必要となるバット・ヘッド軌道の調整に対する手関節トルクの働きの重要性が本研究における力学的エネルギーの流れの結果から改めて明らかとなった。

ノブ側上肢では、関節力パワーにおいてインパクトに近づくにつれて、上腕部、前腕部および手部ともに近位からの力学的エネルギーの流入および遠位への流出が顕著に大きかった (Fig.2 (d), (e), (f), Fig.5 (b)). セグメントトルクパワーにおいてはインパクトに近づくにつれて、上腕部および前腕部の近位からの力学的エネルギーの流入および遠位への流出が顕著に大きかった (Fig.3 (d), (e), Fig.5 (b)). すなわち、ノブ側上肢における力学的エネルギーの上肢末端への伝達量は、関節力パワーおよびセグメントトルクパワーともにバレル側上肢に比べて顕著に大きいことが明らかとなった。小池ほか (2003, 2006) は、インパクト付近においてバット・ヘッドスピードを生成するため、およびバットに作用する遠心力に抗するために、ノブ側上肢では肩関節を中心として大きな関節トルクが発揮されることを報告した。そして、本研究においても関節トルクによる仕事において同傾向がみられた (Fig.4 (g), (h)). これらのことから、上肢各関節トルクについて検討した先行研究と同様に、本研究における上肢各関節の力学的エネルギーの流れに関してもノブ側上肢がバット・スイングに対して大きく関与しているといえる。その際セグメントトルクパワーでは、上腕部の値が前腕部および手部の値よりも顕著に大きかったのに対して、関節力パワーでは、前腕部および手部の値が上腕部の値よりも大きくなる傾向を示した。この理由として、上述したようにノブ側上肢の運動連鎖による働きの関与が要因として挙げられるだろう。加えて、バレル

側の手部と同様にノブ側の手部においても、インパクト付近ではセグメントトルクパワーによる遠位からの力学的エネルギーの流入が増大していた (Fig.3 (f)). このため、バレル側の手関節の働きと同様にノブ側の手部においてもバットに対して抑制をかける働きが示唆されるだろう。

2. 上位群と下位群の力学的エネルギーの流れの違い

ここでは、打撃指導に有効となる着眼点を導き出すために、競技力の優劣を示す評価指標となるバット・ヘッドスピードを用いて、被験者を上位群と下位群とに分けて (全被験者平均値: 35.8 ± 1.4 m/s; 上位群平均値: 36.8 ± 0.8 m/s, 下位群平均値: 34.7 ± 1.1 m/s, $p < 0.01$), 上肢のキネティクスの変量について検討していく。

関節力パワーについて、ノブ側の上腕部および前腕部では 30% 付近からインパクトにかけて、ノブ側の手部では主に 80% 付近からインパクトにかけてそれぞれ上位群が下位群よりも値が大きくなる傾向がみられた (Fig.2 (d), (e), (f)). 上述したように小池ほか (2003, 2006) は、バット・ヘッドスピードの生成にはノブ側の上肢関節トルクが寄与することを報告している。このため、スイング後半においてノブ側上肢の関節力パワーによる上肢末端への力学的エネルギーの伝達量を大きくできることは、大きなバット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。その一方で、特にノブ側の上腕部における遠位への力学的エネルギーの流出量は、近位からの流入量よりも大きかった (Fig.2 (d)). しかし、ノブ側肩関節トルクによる仕事において、第 2 局面では下位群が上位群よりも有意に正值が大きかったのに対して (Fig.4 (f), $p < 0.05$), 第 4 局面では群間に顕著な差はみられなかった (Fig.4 (g)). これらのことから、上位群が肩関節トルクに加えて関節力による力学的エネルギーを下位群よりも上肢末端へと大きく伝達できることは、効率良くバット・ヘッドスピードを生成することに繋がると推察される。その一方で、下位群は第 2 局面において肩関節の仕事が大きくなっていたため、上位群と比べ

て力学的エネルギーの伝達を利用できずに、上肢に頼ったバット・ヘッドスピードの生成を行っていたと推察される。

セグメントトルクパワーについては、まずバレル側上肢では、前腕部において 50% 付近からインパクトにかけて上位群が下位群よりも値が大きくなり、特に 60% から 90% 付近においては有意な差もみられた (Fig.3 (b), $p < 0.05$). このため、バレル側上肢では、主に前腕部および手部におけるセグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流れの群間による差が、バット・ヘッドスピードの差に影響を及ぼすと推察される。また、特に手部では、主に 60% 付近からインパクトにかけて近位からの力学的エネルギーの流入において上位群が下位群よりも値が有意に大きかった。また遠位の流入出においては、同様に 60% 付近以降から上位群では流出が、下位群では流入がみられ、群間による有意な差もみられた (Fig.3 (c), $p < 0.05$). このように、インパクト付近ではボールをミートするためのバット運動の調整が行われることから、特に手部のセグメントパワーにおいて力学的エネルギーの流入出にその傾向が顕著にみられたと考えられる。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と報告し、阿江ほか (2014) は、インパクト付近における尺屈トルクおよび尺屈トルクによる正のトルクパワーが寄与すると報告している。これらのことから、上位群はインパクト付近において大きな尺屈角速度を生成し、正のトルクパワーを増大させることにより手部からバットへと力学的エネルギーを伝達させることができていたと推察される。すなわち、インパクト付近では手関節の橈尺屈動作によるバット・ヘッド軌道の調整に関与する力学的エネルギーの吸収を抑えることがバット・ヘッドスピードの差異を決定する要因になると考えられる。

つぎにノブ側上肢では、上腕部および前腕部において 80% 付近からインパクトにかけて上位群が下位群よりも値が大きくなる傾向がみられた (Fig.3 (d), (e)). また手部においては上腕部および前腕部に比べて値自体は小さいが、主にスイ

ング後半において上位群は下位群よりも値が大きくなる傾向がみられた (Fig.3 (f)). したがって、セグメントトルクパワーにおいても、関節力パワーと同様にノブ側上肢の力学的エネルギーの伝達量を大きくできることがバット・ヘッドスピードの群間による差に寄与すると考えられる。

V 結 論

本研究の目的は、熟練野球選手の打撃動作におけるフォワードスイング局面の左右上肢の力学的エネルギーの流れを明らかにすると共に、バット・ヘッドスピードの異なる被験者の動作を比較することにより打撃指導に関する基礎的知見を得ることであった。

本研究によって得られた結果から、力学的エネルギーの伝達について、上位群は下位群よりもノブ側肩関節トルクに加えて、ノブ側関節力による力学的エネルギーを上肢末端へと大きく伝達できることが明らかとなり、そのことが効率良くバット・ヘッドスピードを生成することに繋がると推察される。

さらに、インパクト付近において上位群はバレル側手関節の正のトルクパワーを増大させることにより、手部からバットへと大きな力学的エネルギーを伝達させることができていると考えられる。すなわち、インパクト付近ではバット・ヘッド軌道の調整に関する力学的エネルギーの吸収を抑えるために、手関節の橈尺屈動作によってバットをコントロールすることが、バット・ヘッドスピードの差異を決定する要因になると考えられる。

本研究によって得られた以上のことは、今後バット・ヘッドスピードを増大させるための上肢動作に関するトレーニング法を考案することに対して重要な示唆を与えるであろう。

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クスの分析. 体育学研究, 59(2): 431-452.

浅見俊雄 (1984) スポーツ運動の打について. J. J. Sports Sci., 3(3): 178-187.

Gola, M. and Monteleone, J.(2001) The Louisville slugger complete book of hitting fault and fixes. Contemporary publishing group, pp.64-65, pp.134-137.

平島雅也・大築立志 (2005) ヒトの高速多関節運動における相互作用トルクの制御. バイオメカニクス研究, 9(1): 18-25.

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, pp.49-53.

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研究: ヘッドスピード上位群と下位群のスイング局面の比較. 体育学研究, 53(2): 423-438.

小池関也 (2010) 力覚検出型センサバットの開発. 機能材料, 30(8): 13-17.

小池関也・石川達也・阿江通良 (2009) テニスサーブ動作における上肢のラケット速度生成メカニズム: 競技レベルの違いが順動力学的貢献に与える影響. 日本機械学会 ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集, pp.76-81.

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, pp.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, pp. "448-1" - "448-6".

松尾知之 (2011) ムチ動作の意義—キネマティクスからエナジェティクス—. 体育の科学, 61(7): 477-483.

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.

村田宗紀・藤井範久・鈴木雄太 (2015) 硬式テニスサーブにおけるエネルギー形態に着目したラケット保持腕の力学的エネルギーフロー. 体育学研究, 60(1): 177-195.

内藤耕三・丸山剛生 (2007) 野球の投球腕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, pp.38-39.
- 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.
- 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.
- 高橋佳三, 阿江通良, 藤井範久, 島田一志, 川村卓, 小池関也（2005）球速の異なる野球投手の動作のキネマティクスの比較. バイオメカニクス研究, 9: 36-52.
- 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.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. Proceeding of the Special Conference of the Canadian Society for Biomechanics, London, Ontario, Canada, Human locomotion, I: 92-93.

（2018 年 4 月 21 日受付）
（2018 年 10 月 2 日受理）

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2019/2/5