バットスイング軌道からみた左右方向への打球の打ち分け技術

森下 義隆^{1), 2)} 矢内 利政³⁾

Yoshitaka Morishita^{1, 2} and Toshimasa Yanai³: Characteristics of the bat-swing trajectory when hitting a ball toward the same and opposite fields. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

Abstract: The purpose of this study was to examine within-subject differences in bat-swing trajectory between intentional hitting towards the same field and towards the opposite field. 19 industrial league baseball batters and 16 collegiate baseball batters performed same-field hitting (SH) and opposite-field hitting (OH). The movement of the bat during the swing was recorded with two high-speed cameras (1000 fps) for 3D analysis. At the instant of ball impact, the striking surface of the bat faced towards the same field in SH and towards the opposite field in OH. The bat-head trajectory immediately before impact was directed obliquely upward in SH, whereas it was directed obliquely downward in OH. Throughout the swing, the projection angle of the bat on the vertical plane was greater in OH than in SH, and the ratio of the translational component of the bat-head speed to the resultant bat-head speed was significantly greater in OH than in SH. These results suggest that the characteristics of the bat swing in OH provide a suitable impact condition to drive the ball towards the opposite field, as evidence has demonstrated that (1) a batted ball is likely to travel towards the opposite field when the lower half of the ball is hit by a vertically inclined bat, and (2) the striking surface of the bat is unlikely to turn to face towards the same field when the contribution to the resultant bat-head speed is generated more by the translational component of the bat-head speed than by the rotational component.

Key words : baseball, batting, kinematics, bat-head speed, 3D analysis

キーワード : 野球, 打撃, キネマティクス, ヘッド速度, 3次元分析

1. 緒 言

野球の打撃では、試合の状況や対戦チームの守備位置に応じて、意図した方向へ打球を放つことが求められる場面がある。そのため、打者は様々な方向に打球を打ち分ける打撃技術を習得することが必要となる。一般にフェアグラウンドを3等分した際、打者が立つバッターボックス側のフィールドへ打球を放つことを「引っ張り」、その反対のフィールドへ打球を放つことを「流し打ち」、

中央のフィールドに打球を放つことを「センター返し」と呼ぶ。指導書には、引っ張りや流し打ちといった左右方向への狙い打ちは、適時打を狙って自由に打撃するよりも得点圏に走者を進める機会を増やすことができ(アメリカ野球指導者協会, 2011, p.26), 大量得点を奪取する確率を高める攻撃法である(功力, 1999, p.52)と記されている。また、狙った方向に打球を放つ技術を習得できれば打率のアップが期待できると述べられており(篠塚, 2013), 左右方向へ打球を打ち分ける技術は、得点の多さで勝負が決する野球の試合に

1) 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15
2) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学部
〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1
3) 早稲田大学スポーツ科学学術院
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15
連絡先 森下義隆

1. Graduate School of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192
2. Department of Sports Sciences, Japan Institute of Sports Sciences
3-15-1 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-0056
3. Faculty of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192
Corresponding author yoshitaka.morishita@jpnnsport.go.jp

において重要な技術であると考えられる。

この打撃技術について一流の野球選手は、バットスイングを開始するタイミングを変えることや、バットの打撃面を狙った方向に向けることが重要であると述べている(篠塚, 2013)。また、打球方向によって動作が異なり、流し打ちを行う際はバットの先端をインコースからアウトコースに押し出すようにスイングすべきであるという(古田, 2010, pp.92-93; Williams and Underwood, 1971, p.42)。静止したボールを左右様々な方向に打撃した際の身体運動を分析した研究によると、流し打ちは他方向への打撃に比べて、踏み込み足の接地した時点からインパクトまでの期間を通じて体幹の角変位が小さい(所謂、体を開かない状態にしている)ことや、バットのグリップエンド寄りを把持する側の肘関節がより伸展位にあることが報告されている(田子ほか, 2006)。投球されたボールを対象にした研究では、流し打ちにおける身体運動を分析した研究(荒木ほか, 2012)や、打ち分けにおけるバットの運動に着目した研究が行われてきた(McIntyre and Pfautsch, 1982; 森下ほか, 2012)。荒木ほか(2012)の研究は、流し打ちにおいてインパクト直前のバット先端の速度(以下「ヘッド速度」と略す)が速い選手と遅い選手の打撃動作を比較しており、速い選手はスイング局面において捕手側の肩関節を屈曲する動作が強調されていることやバットヘッドが捕手方向を向いている付近において投手方向へのグリップエンドの速度が大きいという特徴があることを報告した。McIntyre and Pfautsch (1982)は、ボールとバットの衝突を水平面上で生じる2次元運動として分析し、スイング時間とインパクト時におけるバットの打撃面の方向(バットの長軸を水平面上に投影した角度: 以下「バット水平角」と略す)が、両条件で有意に異なることを報告した。具体的には、引っ張りは流し打ちより0.017秒スイング開始のタイミングが早く、右打者の場合、バットの打撃面をよりレフト側に向けた位置でボールをインパクトしていることが示されている。また、森下ほか(2012)は試合中の打撃において、ヒットと記録され、かつスコアラーによって打球

速度が高いと判定された打球をレフト、センター、ライトの方向別に分析し、インパクト時のバット水平角が打球方向間で有意に異なることを報告した。これは、McIntyre and Pfautschの結果と同様に、インパクト時のバット水平角が打球方向を決定する重要な因子となることを示すものである。しかしながら、ボールとバットの衝突を鉛直横断面で観察すると、バットの打撃面は球面状になっていることから、左右への打球方向はバットの短軸上の衝突位置の影響も受けることになる。城所・矢内(2015)はこの影響に着目して、流し打ちにおけるバットとボールの衝突およびその前後の運動を分析し、右打者であればバットの打撃面がセンターやレフトの方向に向いたインパクトであってもライト方向ヘライナーやフライを放つことが可能であることを示した。ただし、バットの打撃面をレフト方向やセンター方向に向けて放たれた流し打ちは、ライト方向に向けて放たれた流し打ちよりもバットがボールの下部に衝突しているという。このことから、バットの打撃面が打球方向と異なる打撃は、それらが一致する打撃よりも速度の低い打球が飛翔する可能性が高くなると考えられる。したがって、打球の打ち分けを分析した先行研究をまとめると、鋭い打球、すなわち野手の間を抜けるような高速度のライナー・フライ性の打球を左右方向に放つためには、スイング開始のタイミングを変化させることによりバットの打撃面を狙った方向に向け、バットとボールが正面衝突するような軌道でスイングを行うことが重要になると推察される。

2 物体間に起こる衝突では、両物体の重心を結ぶ線分と衝撃線が一致する直中心衝撃(ベアー・ジョンストン, 1996, pp.604-605)において最大の撃力が作用することが知られている。この原理をバットとボールの衝突に当てはめると、インパクト直前のボールの軌道とバットのスイング軌道が一致し、かつこれらの軌道と衝撃線が一致する場合に打球速度は最大化されることになる。これを支持する現象は、硬式野球のボールとバットを2次元剛体としてモデル化した数値シミュレーションにおいて示されている(Watts and Baroni,

1989). したがって、通常、投球されたボールは落下しながらホームベース上を通過するため、高速度の打球を放つためには、打者はインパクト直前にバット先端（以下「バットヘッド」と略す）の速度ベクトルを上方に傾けたスイング（以下「アップースイング」と略す）を行うことが重要になる。投球されたボールに対する打撃動作を分析した研究では、高速度で飛距離の長い打球が放たれた際のインパクト直前のバットヘッドの軌道は、水平面と平行またはアップースイングになっていることが報告されており（城所ほか，2011；及川ほか，1996），実際の打撃においても上記を支持する現象が確認されている。しかしながら，これらの研究は投球されたボール軌道とほぼ同一の軌道に打球が打ち返されるセンター返しを分析対象にしているため，投球と打球の軌道が大きく異なる引っ張りや流し打ちにおいても同様の現象がみられるかは確認されていない。一方，試合中の打撃動作を調査した研究では，長打が放たれた際のインパクト直前のヘッド速度の方向は左右の打球方向によって有意に異なり，引っ張りでは約5°上方に傾いており，センター返しでは約3°上方に，流し打ちでは約3°下方に傾いていたと報告されている（森下ほか，2012）。この結果は，引っ張りから流し打ちの方向へ打撃するにつれて，バットヘッドの軌道は徐々に下降方向へ変化することを示しており，比較的高速度の打球や飛距離の長い打球からなる長打の打ち分けにおいて，流し打ち方向へ飛翔した打球ほど打球速度が最大化されていない可能性や打球速度を最大化させるスイングでなくとも長打を放つことができることを示唆するものである。ただし，森下ほか（2012）の研究は実際の試合における様々な選手の打席の内，結果的に長打と記録された打席のみを分析対象としていることから，各打球方向について分析対象となった選手群が同一ではないことに加え，各打撃における投球条件が異なっているという問題がある。そのため，打球方向間で観察されたインパクト直前のスイングの特徴の差異が，投球条件の差異やスイングの個人差によって生じた可能性がある。

鋭い打球を放つための最適なインパクト条件については，バットに対するボールのインパクト位置の変動が打球に与える影響をシミュレートした研究（Sawicki et al., 2003；志村ほか，2012；Watts and Baroni, 1989）やそれを実測した研究（Cross and Nathan, 2006；城所ほか，2011）によって明らかにされてきた。先行研究が報告した主な知見は，インパクト時のヘッド速度が大きいほど打球速度が大きくなること，バット横断面の中心から上下方向へ離れた位置でインパクトするほど打球の速度は減少し回転数は増大すること，ボール中心のやや下側をアップースイングでインパクトすると打球飛距離が最大になるということである。これらの知見はボールとバットの衝突を同一平面（バット横断面）上で生じた運動として扱った2次元分析による成果であるが，バット縦断面上での運動を含めた3次元空間のどの方向に打球を放つ際にも適用し得るものと考えられる。しかしながら，打者が実際にそのようなインパクトを行った際に，どのようにバットを移動・回転させているかというスイングの過程はこれまで明らかにされていない。打者が打球の打ち分け技術を習得・向上させるためには，バットが加速し始めてからインパクトまでのスイング局面全体を通して，スイング軌道の変化を定量化した知見が必要であると考えられる。そこで本研究では，同一投球条件において，同一群が引っ張り方向と流し打ち方向に鋭い打球を放った際のバットの運動を3次元的に比較し，左右方向に打球を打ち分けるためのスイング軌道の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 方 法

2.1 被験者

被験者は東京六大学野球連盟に所属する選手16名と日本野球連盟に所属する社会人選手19名の計35名（身長： 1.77 ± 0.04 m，体重： 79.7 ± 5.8 kg，年齢： 23.1 ± 3.7 yr）であり，このうち右打者が16名，左打者が19名であった。本研究は，早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委

員会の承認を得た上で実施しており、被験者には事前に本研究の目的および実験内容について十分な説明を行い、書面によって実験参加に対する同意を得た。

2.2 データ収集

実験は2回に分けて行った。1回目は大学生選手を対象としたデータ収集を室内練習場で実施し、2回目は社会人選手を対象としたデータ収集を屋外の野球場で実施した。被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、ピッチングマシンを用いた打撃を行わせた。ピッチングマシンはホームベースから正規の距離(18.44 m)離れた位置に設置し、一定のボール速度で打者のストライクゾーンの真ん中付近を狙って硬式野球ボールを投射した。このとき、全試技において投球の発射位置、発射角度が一定になるように設定した。実際に投射されたボールの球速は 30.9 ± 0.7 m/sであり、日間差は0.5 m/sであった。被験者には硬式用木製バット(長さ:0.84 m, 質量:0.893 kg)を用いて、予め験者が指示した方向に鋭い打球を放つように指示を与えた。なお、本研究では鋭い打球のことを「高速度のライナー・フライ性の打球」と定義した。打球方向はフェアグラウンドを3等分し、被験者が立つ打席側のフィールドを引っ張り方向、中心のフィールドを挟んで反対側のフィールドを流し打ち方向に分類し、各方向への打撃を、それぞれ『引っ張り: Same-field hitting, 以下「SH」と略す)』と『流し打ち:

Opposite-field hitting, 以下「OH」と略す)』と定義した(Figure 1)。本研究では、指定したフィールドに打球が落下し、かつ被験者の自己評価が最も高い試技を成功試技とした。自己評価は鋭い打球を打てたかどうかを3段階で評価するものであり、試技毎に回答させた。実験は、各被験者につき各方向に成功試技が1試技収集できるまで継続した。成功試技が得られるまでに要した試行数はSHが 8 ± 5 回、OHが 7 ± 4 回であった。

実験中のバットとボールの運動は、電氣的に同期された2台の高速度カメラ(Phantom Miro, Vision Research社製)を用いて、撮影速度1000 fps, 露光時間200—300 ms, 解像度 640×480 pixelで撮影した。撮影範囲を3次元空間として構築するため、実験前に68個のコントロールポイントで構成される放射状の較正器をホームベース付近に設置して撮影を行った。

2.3 データ処理

各被験者の引っ張りとし打ちの成功試技を各1試技、計70試技(被験者35名 $\times$ 2試技)を分析対象とした。各試技の分析範囲は、バットのスイング開始からボール・インパクトまでとした。スイング開始の定義については、ヘッド速度の投手方向成分が3 m/sを超えた瞬間(川村ほか, 2008)や踏出し足に作用する地面反力が最大に達した瞬間(川端・伊藤, 2012)、ヘッドスピードが1 m/sに達した瞬間(Horiuchi and Sakurai, 2016)と定義されるなど、統一されていない。川

Figure 1 Definition of the direction of batted ball.

村ほかや Horiuchi and Sakurai の定義では、バットヘッドやグリップエンドを細かく動かしながらタイミングを取る被験者がいた場合、まだバットヘッドの加速が始まらない時点がスイング開始時として算出されるため、本研究では阿江ほか (2014) の方法を参考にバットヘッドとグリップエンドのスピードの和が 5m/s 以上に達した時点のコマとした。また、インパクト時は撮影した映像からバットとボールの接触が最初に目視で確認された時点の 1 コマ前とした。

ホームプレート の捕手側の頂点を原点とし、右打席から左打席に向かう方向を X_G 軸 (内外角方向)、原点から水平面上でピッチングマシンに向かう方向を Y_G 軸 (前後方向)、鉛直上方向を Z_G 軸 (上下方向) として基準座標系 R_G (X_G , Y_G , Z_G) を定義した。また、 R_G に対するバットの方位を算出するために、バットのグリップエンドからバットヘッドに向かう方向が X_B 軸、 Z_G 軸と X_B 軸とを外積した方向が Y_B 軸、 X_B 軸と Y_B 軸とを外積した方向が Z_B 軸となるバット座標系 R_B (X_B , Y_B , Z_B) を定義した。 R_G から計測したバットとボールの 3 次元座標を得るために、動作解析ソフトウェア (Frame-DIAS V, DKH 社製) を用いてデジタイズを行った。デジタイズポイントはバットヘッドの中心、バットヘッドからグリップエンドに向かって 0.49 m 離れた位置に巻きつけたテープの中心、ボール中心の 3 点とした。マニュアルデジタイズによるランダムノイズを低減するために、デジタイズは 1000 Hz で撮影した映像の全コマについては行わず、3 コマ間隔をおいた各フレームについて行った (250 フレーム/s)。デジタイズによって得られた 2 次元座標データは 3 次スプライン関数により元の 1000 Hz のデータになるように補間した。デジタイズから得られた座標は DLT 法を用いて 3 次元座標に変換した。なお、本研究では全被験者のデータが右打者の打撃動作とみなせるように、左打者の座標値については反転処理を行った。

バット座標は Winter (1990) の方法によって遮断周波数 (21.2—39.9 Hz) を決定し、4 次の Butterworth digital filter で平滑化した。なお、ボール・

インパクトによるバットの急激なスピードの変化が平滑化に及ぼす影響を最小限に抑える為、インパクト時のデータを基準に点対称に回転させたデータをインパクト後の座標値として 20 コマ分外挿した後に平滑化を行った (Smith, 1989)。

2.4 算出項目

ピッチングマシンから投げられたボールが打球方向間で統一されているかを確認するために、投球の速度 ($V_{pitched}$) と水平および鉛直方向の投射角度 ($\theta_{H/pitched}$, $\theta_{V/pitched}$) を算出した。インパクト付近のバットの運動を分析するため、インパクト直前のヘッド速度 (V_{head}) と水平面とバットヘッドの速度ベクトルとのなす角度 (スイング角度)、インパクト時のバットの水平面上の角度 (バット水平角, $\theta_{H/bat}$) と鉛直面上の角度 (バット鉛直角, $\theta_{V/bat}$) を算出した (Figure 2)。また、スイング開始時のバット水平角とバット鉛直角、およびスイング開始からインパクトまでの時間 (スイング時間, T_{swing}) についても算出した。これらの項目のうち、投球の速度、投射角度、スイング角度、バット角度 (バット水平角、バット鉛直角) の算出は、城所・矢内 (2015) と同様の方法を用いた。

ヘッド速度 (V_{head}) は、バットの運動を並進運動と回転運動に分けて考えることにより以下のように算出した。

$$V_{head} = \mathbf{u}_{head} \cdot \mathbf{V}_{CG} + \mathbf{u}_{head} \cdot \mathbf{V}_{head/CG}$$

このとき、 $\mathbf{u}_{head}$ はヘッド速度の単位ベクトル、 $\mathbf{V}_{CG}$ はバット重心の速度ベクトル、 $\mathbf{V}_{head/CG}$ はバット重心に対するヘッドの速度ベクトルを表してい

Figure 2 Definition of the bat angle.

る。なお、インパクト付近のバットは高速に移動しながら速度が上昇している局面であるため、インパクト時のヘッド速度は上式から求めたインパクト直前3コマの速度を平均することによって算出した。スイング時間 (T_{swing}) は、スイング開始からインパクトまでのコマ数をカウントすることによって算出した。また、打者の身体に対してどの位置でボールをインパクトしているかを表すために、スイング開始前 (インパクトの0.25秒前) における被験者の捕手側の足関節中心 (軸足) に対するインパクト時のボール座標を求めた。

打球方向の違いによるバットのスイング軌道を比較するために、バット水平角を 45° ごとに区切った時点 (-180° , -135° , -90° , -45°) におけるバット鉛直角、およびヘッド速度とそれを構成する並進成分 ($\mathbf{u}_{\text{head}} \cdot \mathbf{V}_{\text{CG}}$) と回転成分 ($\mathbf{u}_{\text{head}} \cdot \mathbf{V}_{\text{head/CG}}$) の割合を算出した。ヘッド速度の並進成分と回転成分の割合 (%) は、当該時点における両成分を同時点のヘッド速度で除すことによって算出した。また、インパクト付近のスイング軌道を比較するため、SH においては OH におけるインパクト時点でのバット水平角 (平均値 $\pm$ 標準偏差: $-14.6 \pm 8.3^\circ$) と同等のバット水平角が記録された瞬間 (BI_{OH}) について、同様の値を算出した (Figure 3)。

Figure 3 Definition of time points of the bat-swing phase.

2.5 統計処理

投球速度、投射角度、インパクト直前のヘッド速度とスイング角度、スイング開始時とインパクト時のバット角度、スイング時間、軸足に対するインパクト時のボール座標は平均値 $\pm$ 標準偏差、および最小値、最大値で示した。これらの項目において打球方向間の違いを比較するため、対応のある t 検定を行った。

スイング局面の各時点におけるバット鉛直角、ヘッド速度、およびヘッド速度の並進成分と回転成分の割合は平均値 $\pm$ 標準偏差で表し、2way-ANOVA (打球方向: 2 条件 $\times$ バット水平角: 5 時点) を用いて比較した。交互作用および主効果が認められた項目には、ボンフェローニ法を用いて多重比較検定を行った。なお、統計処理における有意水準は全て 5% 未満に設定した。

3. 結果

Table 1 は SH と OH におけるボールとバットのキネマティックデータ、および対応のある t 検定の結果を示している。投球速度に条件間の差は認められなかったが、水平方向と鉛直方向の角度には有意な条件間差が認められた ($p < .05$)。インパクト直前のヘッド速度に条件間差はなかったが、スイング角度には有意な条件間差が認められ ($p < .001$)、SH は OH よりも水平面に対してバットヘッドが上向きの軌道でインパクトを迎えていた。バット角度は、スイング開始時のバット鉛直角に条件間差はなかったが、バット水平角は OH の方が有意に小さく ($p < .001$)、バットヘッドが SH よりも投手側を向いた状態からバットの加速が始まっていた。インパクト時におけるバット水平角は、全ての SH 試技において正の値 ($5.8-31.8^\circ$) でありバットの打撃面がセンターもしくはレフト側を向いていたのに対して、OH は $-29.4-1.5^\circ$ でありバットの打撃面をセンターもしくはライト側に向けてインパクトしていた。このとき、バット鉛直角は全試技において正の値であり、グリップエンドに対してバットヘッドが下方に位置していたが、OH は SH よりもグリップエ

Table 1 Mean values, standard deviations, minimum values and maximum values each parameter.

			Same-field hitting			Opposite-field hitting			t-test
			Mean $\pm$ SD	Min.	Max.	Mean $\pm$ SD	Min.	Max.	
Pitched ball	V_{pitched} [m/s]		30.8 $\pm$ 0.9	28.1	32.1	31.1 $\pm$ 0.7	29.4	32.4	ns
	$\theta_{H/\text{pitched}}$ [°]		0.2 $\pm$ 1.4	-2.2	2.0	-0.1 $\pm$ 1.3	-2.4	1.7	*
	$\theta_{V/\text{pitched}}$ [°]		4.3 $\pm$ 0.7	2.9	6.2	4.6 $\pm$ 0.6	3.1	5.8	*
Bat-swing	V_{head} [m/s]		35.7 $\pm$ 1.7	32.4	39.1	35.3 $\pm$ 1.2	33.1	38.6	ns
	θ_{swing} [°]		6.0 $\pm$ 3.9	-1.5	13.8	-2.9 $\pm$ 4.7	-12.1	5.5	***
	T_{swing} [s]		0.169 $\pm$ 0.017	0.145	0.214	0.157 $\pm$ 0.014	0.134	0.187	***
Bat angle at starting of bat-swing	$\theta_{H/\text{bat}}$ [°]		-221.1 $\pm$ 18.0	-268.9	-182.6	-226.5 $\pm$ 17.5	-270.1	-187.3	***
	$\theta_{V/\text{bat}}$ [°]		-37.9 $\pm$ 9.3	-61.4	-19.9	-37.2 $\pm$ 8.9	-59.1	-15.4	ns
Bat angle at ball impact	$\theta_{H/\text{bat}}$ [°]		18.4 $\pm$ 6.7	5.8	31.8	-14.6 $\pm$ 8.3	-29.4	1.5	***
	$\theta_{V/\text{bat}}$ [°]		21.1 $\pm$ 5.5	10.8	32.1	26.6 $\pm$ 6.9	12.4	41.4	***
Impact point to pivot foot	X_G -coordinate [m]		0.79 $\pm$ 0.09	0.54	0.95	0.92 $\pm$ 0.10	0.75	1.19	***
	Y_G -coordinate [m]		1.05 $\pm$ 0.11	0.79	1.28	0.67 $\pm$ 0.13	0.39	0.93	***
	Z_G -coordinate [m]		0.80 $\pm$ 0.12	0.60	1.07	0.74 $\pm$ 0.14	0.42	1.05	**

*: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .001$, ns: no significant difference

ンドに対するバットヘッドの位置が有意に低かった ($p < .001$)。スイング時間について有意な条件間差が認められ ($p < .001$)、SH は OH よりも 0.012 秒長かった。軸足に対するインパクト位置は、全ての方向において有意な条件間差が認められ (X_G , Y_G 成分: $p < .001$, Z_G 成分: $p < .01$)、 X_G 成分 (内外角方向) をみると、OH は SH よりも外角でインパクトしていた。また、 Y_G 成分 (前後方向) と Z_G 成分 (上下方向) は SH の方が大きく、SH は OH よりも投手側かつ高めでインパクトを迎えていた。

Figure 4, 5 は、スイング局面の各時点におけるバット鉛直角、およびヘッド速度とそれを構成する並進成分と回転成分の割合を示している。2way-ANOVA の結果、バット鉛直角は打球方向とバット水平角の要因間に交互作用がみられ ($p < .001$)、事後検定において、バット水平角が -135° 以降において条件間に有意な差がみられた ($p < .001$)。また、両条件ともインパクトに向けてバット鉛直角が有意に増加した ($p < .001$) (Figure 4)。ヘッド速度は両要因間に有意な交互作用がみられ ($p < .001$)、事後検定の結果、全てのバット水平角の局面で OH の方が SH よりヘッド速度が高く、打球方向に依らずヘッド速度は

Figure 4 Changes in the vertical angle of the bat during batting.

インパクトまで有意に増加した ($p < .001$) (Figure 5a)。ヘッド速度の並進成分と回転成分の割合は、どちらも交互作用はなく、打球方向とバット水平角に主効果が認められた (打球方向: $p < .01$, バット水平角: $p < .001$)。事後検定の結果、バット水平角が -135° 以降は、並進成分の割合は有意に増加し、回転成分の割合は有意に減少した ($p < .001$) (Figure 5b, c)。

Figure 5 Changes in the bat-head speed, the ratio of translational and rotational components to the bat-head speed during batting.

4. 考 察

本研究の目的は、引っ張り（SH）と流し打ち（OH）の打撃動作を比較し、鋭い打球を左右に打ち分けるためのスイング軌道の特徴を検讨することであった。熟練した打者に打ち分けを行わせた結果、SHはOHよりもインパクト直前のスイング角度が大きく、バットの打撃面がセンターもしくはレフト側を向いてインパクトしていた。また、スイング局面の各時点において、OHはSHよりもグリップエンドに対するバットヘッドの位置が低く、ヘッド速度の並進成分の割合が大きいスイングであった。これらのバットのスイング特性から、左右方向へ鋭い打球を打ち分けるためには、スイング局面を通してバットを移動・回転させる方法を変化させていることが示唆された。

本研究の実験設定（マシン打撃）において、条

件間で完全にコントロールできなかった因子（打球コンディションや打者が打撃したボールのコース）が研究結果に及ぼす影響について考察する。まず打球コンディションについて検証する。SHとOHで比較すると、打球スピードに有意差はなかったが、打球の水平方向と鉛直方向の角度はそれぞれ有意に異なっており、OHの方がSHよりもボールの飛翔軌道が内角から外角の方向に、そして下方向への傾きが大きかった（Table 1）。しかしながら、両条件の投射角度の差は水平方向、鉛直方向ともに平均で 0.3° と非常に小さく、投射角度の範囲は水平方向（SH： -2.2 — 2.0° vs. OH： -2.4 — 1.7° ）、鉛直方向（SH： 2.9 — 6.2° vs. OH： 3.1 — 5.8° ）共に概ね重なっていた。さらに、本研究の分析精度（デジタルの再現性）を検証したところ、水平方向と鉛直方向ともに平均 0.4° の誤差が見込まれることが確認された。したがって、両条件の投射角度に統計的な有意差は認めら

れたものの、この差が物理的な意味を持つ条件間差を示すエビデンスとは言い難く、本研究において観察された打撃技術（打球を左右に打ち分ける際のスイング技術の特徴）に影響を及ぼしたとは考えにくい。次に、打者が打撃したボールのコースについて検証する。捕手側の足関節（軸足）に対するインパクト位置は全ての成分が有意に異なっており、SHはOHよりも投球コースが内角寄りかつ上方であり、投手寄りでインパクトを迎えていた（Table 1）。本研究では被験者に対して打撃時における軸足の位置に特別な指示を与えなかったが、基準座標系からみた軸足の位置を算出したところ、SHの方がOHよりも平均で0.08mホームベースに近付いていたことが確認された。インパクト位置のY_G成分（前後方向）の違いはMcIntyre and Pfausch（1982）の報告と同様の結果であった。これらのデータは、両条件でピッチングマシンの設定を一定にしていたものの、打者が打ち分けを行いやすい投球コースを選択的に打撃していたことや、ピッチングマシンから投げられたボールが打ち分けやすいコースとなるよう、打席に入った際の立ち位置そのものを変化させていたことを示すものと考えられる。打球の打ち分けに関して指導現場では、投球コースによって前後方向のインパクト位置を調節することが推奨されており、内角に投げられたボールは前方（投手寄り）でインパクトすることにより引っ張り方向へ、外角に投げられたボールは後方（捕手寄り）でインパクトすることにより流し打ち方向へ打球を放つことが通常の打撃であるとされている（アメリカ野球指導者協会, 2011, pp.27-28; 古田, 2010, p.25）。このことから、インパクト位置や軸足の位置にみられた差異は、験者の指定した方向へ打球を放つために各打者が行った微調整を示すものと推察される。したがって、両条件のスイング特性にはインパクト位置の差異を生じさせた原因や差異によってもたらされた影響も含まれることになるが、本研究ではそれらを含め打ち分けるための通常打撃の特性とみなして考察を進めることとする。また、本研究は予め被験者に打球方向を指定して打撃を行わせたため、打球方向を指

定しない打撃（自由打撃）とは異なる結果が得られた可能性がある。自由打撃では投げられたボールのコースを確認してからスイング軌道が調整されることが予想されるため、打球方向を指定した打撃のようなスイング開始前からの微調整は行われていないと考えられる。また、自由打撃はスイング開始のタイミングの違いによって狙った方向とは逆方向に打球が飛翔することもあるため、本研究結果は打者が意図した方向に打球を放つ際に限定された特徴として解釈する必要がある。

インパクト直前における両条件のバットのヘッド速度は同程度であったが、スイング角度はSH ($6.0 \pm 3.9^\circ$)の方がOH ($-2.9 \pm 4.7^\circ$)よりも大きく（Table 1）、SHはインパクトに向かってバットヘッドが上昇する軌道（アッパースイング）であったのに対して、OHは下降する軌道（ダウンスイング）であった。ボール・インパクトの数値シミュレーションを行った Sawicki et al. (2003)の研究では、打球の飛距離にはヘッド速度が最も強く影響し、約 9° のスイング角度でインパクトすることによって飛距離を最大化できることを報告している。また、ピッチングマシンから投げられるボールをセンター方向に打ち返す際の打撃動作を分析した城所ほか（2011）の研究も Sawicki et al. の報告と類似した結果を報告しており、打球飛距離を伸ばすにはヘッド速度を高め、アッパースイングでインパクトすることが重要であることを示している。これらの知見を踏まえると、SHはOHよりも打球飛距離が大きくなりやすいスイング軌道でインパクトを迎えられていると考えられる。実際、メジャーリーグの2015年シーズンでは、右打者が放った本塁打の総数（2867本）に対してレフト方向へ放たれたのは66%（1902本）を占めており（Baseball savant, online）、この成績は上述した考察を裏付けるものと言える。長打になるような鋭い打球の特徴の1つである打球速度の大きさは、インパクト直前にボールとバットヘッドが並進運動をしており、双方の軌道が同一直線上に並んだ条件下で衝突した場合に最大化される。先行研究によると約30 m/sで投球されたボールは、インパクト直前、水平面に対して下

向きに 5° 程度落下しながら並進運動していることが示されている（城所ほか，2011；城所・矢内，2015）．打者がこのような軌道のボールに対して飛距離の長い打球を放つには，打球方向に関係なく，インパクト直前のバットヘッドがボールの進行方向と一致するような水平面に対して上向きの軌道（アップースイング）でインパクトすることが重要となる．しかしながら，本研究結果は森下ほか（2012）の報告と同様に，SH はアップースイング，OH は水平面に平行なスイングまたはダウンースイングが行われており，OH は飛距離の長い打球を放つための理想的な軌道でインパクトを迎えられていなかったことが示された．両条件のスイング角度が異なった要因の 1 つには，SH が OH のバットヘッド軌道の延長線上でインパクトしていたことが推察される．スイング軌道の典型例を側方（ Y_G - Z_G 平面）からみると，インパクト付近のバットヘッドは両条件ともに下に凸の 2 次曲線のような軌道を辿っており，SH は曲線の頂点を過ぎた直後で，OH は頂点付近でインパクトを迎えていることが観察された（Figure 6 右）．両条件でバット水平角が等しくなる時点において，バットヘッドの曲線軌道が類似しているかを確認するため， BI_{OH} におけるスイング角度を比較したところ有意な差は認められなかった（SH: $-2.6 \pm 4.0^\circ$ ，OH: $-2.9 \pm 4.7^\circ$ ， $p = .528$ ）．また，インパクト時のバット水平角に約 30° の条件間差が観察されたが，OH のインパクト直前のヘッド速度（約 35 m/s）を維持したままバットを

水平回転させると仮定すると， 30° 回転するのに約 0.013 秒の時間が必要となる．この時間は，本研究で算出した両条件のスイング時間の差（0.013 秒）と一致していたことから，主に両条件のバット水平角の違いに起因したものとと言える． BI_{OH} において両条件のスイング角度がほぼ同程度であることも踏まえると，両条件のバットヘッドが最下点付近を通過する際の軌道は極めて類似しており，SH は OH の軌道の延長線上でインパクトを迎えている可能性が高い．両条件のバットヘッド軌道が類似しているということは，スイング開始のタイミングやスイング中にヘッド速度を上昇させるタイミングが僅かに変化することによって，前後方向のインパクト位置が変化することに繋がる．これにより，インパクト直前のヘッド速度の方向も変化するため，両条件のスイング角度が異なると推察される．

スイング局面の各イベントにおけるバット鉛直角は， -135° から BI_{OH} まで OH の方が大きかった（Figure 4）．これは，OH の方がグリップエンドに対するバットヘッドの相対的な位置が低い（バットヘッドを下方に倒した）スイングであったことを意味する．流し打ちのインパクトメカニズムを分析した城所・矢内（2015）は，バット長軸が水平面と平行でない場合（ $\theta_{V/bat} \neq 0$ ），バットの下向き傾斜とボールの下部を打撃することの相互作用によって，バットの打撃面をライト方向に向けなくても流し打ちが可能であることを報告している．また，バット水平角が一定の場合，バットの下向き傾斜が大きく，ボールの下部への打撃位置が低いほどライト方向に打球が放たれることを示している．先行研究の結果から本研究結果が生じた要因を考えると，打者は OH を行う際，スイング局面の早い段階からバットヘッドを SH よりも下方に倒してスイングすることで，インパクトにおいてライト方向に打球が放たれやすいコンディションを作り出していたと推察される．しかしながら，OH は SH よりもインパクト位置が有意に低かった（Table 1）ことから，両条件のバット鉛直角の違いは打球方向ではなくインパクト位置の高さ（Figure 7）に起因している可能性がある．

Figure 6 Typical bat-swing trajectory from the time of swing start to the ball impact of SH and OH.

Figure 7 Impact point relative to pivot foot viewed from YG-ZG plane.

Figure 8 Relationships between height of impact point and vertical angle of the bat at ball impact.

実際にインパクト時におけるバット鉛直角とインパクト位置の高さとの相関関係を調べてみると、両条件ともに有意な負の相関が認められ (SH: $r = -.752$, OH: $r = -.773$, $p < .01$)、インパクト位置が高いほどバット鉛直角が小さくなるという関係がみられた (Figure 8)。そこで、両条件のバット鉛直角が同じ高さでインパクトした際でも流し打ちの方が大きくなるかどうかを検証するために、インパクト位置の高さを共変量としてその影響を統制した共分散分析を行った。その結果、インパクト時のバット鉛直角は両条件で有意な差が認められ ($p < .01$)、同じ高さでインパクトした際のバット鉛直角は OH の方が SH よりも 3.2° 大きいことが示された。これは、バットの下方への傾斜角度がインパクト時のボールの高さに関係なく OH の方が大きかったことを表している。以上のことから、打球を打ち分けるためのスイング軌道は打球方向によって異なっており、打者はスイング局面の前半からグリップエンドに対するバットヘッドの高さを調整することによって打ち分けを可能にしていたと推察される。

バットのヘッド速度は、全てのイベントで OH の方が SH よりも高かった (Figure 5a) が、これはスイング開始時のバット水平角が OH の方が小さかったこと (Table 1) が関係すると考えられる。両条件のスイング軌道を打者の頭上から観察

すると、OH は SH よりもバットを時計まわりに回転させた位置からスイングが開始されており (Figure 6 左)、被験者 35 名中 32 名がこのパターンに該当していた。これらのことは、OH は SH よりもスイング開始時から各イベントまでのバット水平角の角変位が大きいことを示している。すなわち、OH はバットヘッドの加速距離が長くなったことに起因して、スイング局面全体で SH よりもヘッド速度が高くなったと考えられる。ヘッド速度を構成する両成分の割合をみると、両条件ともにスイング局面が進むにつれて並進成分が増加し、回転成分が減少しており (Figure 5b, c), BI_{OH} において並進成分はヘッド速度の約 7 割を占めていた。ティー打撃でセンター返しを行った際のヘッド速度が生み出される力学的要因を分析した研究 (森下ほか, 2015) によると、インパクト時のヘッド速度の 70% が並進運動による速度で、25% が回転運動による速度であり、それぞれの速度は打者の両手部がバットに加えた力とトルクによって生み出されていることが報告されている。ヘッド速度の並進成分はバットの並進運動によってもたらされるヘッド速度を示し、回転成分はバットの重心まわりの回転運動によってもたらされるヘッド速度を示すものである。つまり、本研究で算出したヘッド速度を構成する両成分の割合は、先行研究で算出された割合と極めて類似し

ていることが分かる。しかしながら、両成分には SH と OH の間で統計的に有意差が認められており、SH の方が OH よりも並進成分が小さく、回転成分が大きいという結果であった。ヘッド速度を構成する両成分の割合にこのような条件間差がみられたことは、SH は OH よりもバットの並進運動を抑制し、回転運動を促進させることによってバットヘッドを加速させている、もしくは OH がその逆の方法でバットを加速させていることを示唆している。また、スイング開始からインパクトまでのバット水平角の変化量を両条件で比較すると、SH が $239.5 \pm 19.3^\circ$ 、OH が $211.9 \pm 19.0^\circ$ であり、約 30° の違いがみられた。左右方向に打球速度の高い打球を放つには、バットの打撃面を狙った方向に向けてインパクトすることが重要である（城所ほか、2013）。そのため、両条件のヘッド速度を構成する成分の違いは、打者がバットの打撃面の向きを 30° 程度調節するために生じたものと考えられる。

本研究で明らかにした特徴を有するスイングを実践する方法について、バットに作用した力とモーメントの役割を分析した先行研究を参考に考察する。バット鉛直角の変位は、両手部がバットに加える力（合力）が発生させるバット重心ま

わりのモーメントによって生み出され（森下ほか、2015）、両手部がバットに加えた偶力によるフリーモーメント（トルク）によってバットヘッドがグリップエンドよりも低くなり過ぎないように調整されていることが報告されている（小池・阿江、2012、森下ほか、2015）。このことから、OH を行うには両手部のトルクによってバットヘッドを上方へ持ち上げる回転効果を抑制することにより、バットヘッドの下方への傾斜角を大きくしておくことが大切であると考えられる。また、バットヘッド側の手部はバットヘッドの進行方向に、グリップエンド側の手部はその逆方向に力を加えており（小池・阿江、2012）、この偶力による効果と両手部がバットに加えたフリーモーメントの和によってバット水平角の角変位が生み出されると報告されていることから（森下ほか、2015）、OH を行うにはグリップエンド側の手部でバットヘッドの進行方向に力を加えるようにスイングすることで、バットの水平回転を抑制する必要があると考えられる（Figure 9）。なお、「バットヘッドの進行方向に力を加える」という考察は、緒言で示した指導書（古田、2010；Williams and Underwood, 1971）の記述（「バットの先端をインコースからアウトコースに押し出すようにス

Figure 9 Way to enable Opposite-field hitting. Because of the bat-head velocity to the grip-end ($V_{BH/GE}$) component of the resultant force, it is possible to encumber the horizontal rotation of the bat to the pitcher direction resulting from the moment of resultant force.

イングすべきである」と同義であると考えられるため、本研究で考察した方法は現場における指導方法を支持するものである。OHを練習する際にこれら2項目を実践することにより、流し打ち方向へ鋭い打球を放つ確率を高められると考えられる。ただし、同方向へ飛距離の長い打球を放つには、上記の方法に加えて、バットヘッドが上昇中にインパクトが迎えられるようにスイング軌道を調整することが必要になる。

5. 結 論

意図した方向に鋭い打球が放たれた際のバットの運動を引っ張りとし打ちで比較した結果、両条件はインパクト時にバットの打撃面が狙った方向に向いているだけではなく、引っ張りはアップスイング、流し打ちはダウンスイングでインパクトを迎えていることが示された。また、両条件はスイング局面を通して、バット鉛直角およびバットのヘッド速度を構成する並進・回転成分の割合が異なることが明らかとなり、流し打ちは引っ張りよりもグリップエンドに対するバットヘッドの位置が低く、ヘッド速度の並進成分の割合を大きくしてスイングを行うことで、インパクトにおいて流し打ち方向へ打球が飛翔しやすいコンディションを作り出していることが示された。

謝辞

本研究は、早稲田大学グローバル COE プログラム「アクティヴ・ライフを創出するスポーツ科学」の助成を受けたものである。

文 献

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分析. 体育学研究, 59(2): 431-452.
 アメリカ野球指導者協会: 平野裕一訳 (2011) 野球一勝のための戦術・戦略. 大修館書店.
 荒木理行・川村卓・島田一志・平野裕一・松尾知之・那須大毅・森下義隆 (2012) ヘッド速度を大きくするための動作要因について～流し打ち方向への打撃動作の分析～. バイオメカニクス研究, 16(1): 47-51.

Baseball Savant (online) Baseballsavant.com, Statcast Search, https://baseballsavant.mlb.com/statcast_search, (参照日 2016 年 8 月 2 日).
 ベアー F.P.・ジョンストン E.R.: 長谷川節訳 (1996) 工学のための力学〈下〉原著改訂第3版. ブレイン図書出版, pp.604-605.
 Cross, R. and Nathan, A. M. (2006) Scattering of a baseball by a bat. American Journal of Physics 74 (10): 896-904.
 古田敦也 (2010) フルタの方程式 バッターズバイブル. 朝日新聞出版.
 Horiuchi, G. and Sakurai, S. (2016) Kinetic analyses on increase of bat head speed in baseball batting. International Journal of Sport and Health Science, 14: 94-101.
 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イングに及ぼす影響. 体育学研究, 57(2): 557-565.
 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イング局面の比較. 体育学研究, 53: 423-438.
 城所収二・近田彰治・矢内利政 (2013) 野球のバッティングにおける左右への打ち分けを可能にするバット角度. スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2013, 119.
 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イング特性. バイオメカニクス研究, 15(3): 78-86.
 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・阿江数通 (2012) 野球打撃動作のバイオメカニクス. 体育の科学, 62(10): 773-781.
 功力靖雄 (1999) アマチュア野球教本Ⅲ 攻撃のマニュアル. ベースボール・マガジン社. p.52.
 McIntyre, D. R. and Pfausch, E. W. (1982) A kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. Research Quarterly for Exercise and Sport, 53 (3): 206-213.
 森下義隆・平野裕一・矢内利政 (2015) 野球打撃におけるインパクト時のバットのヘッドスピードと方位を決定する力学的要因. バイオメカニクス研究, 19(4): 201-215.
 森下義隆・那須大毅・神事努・平野裕一 (2012) 広角に長打を放つためのバットの動き. バイオメカニクス研究, 16(1): 52-59.
 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. *American Journal of Physics*, 71 (11): 1152-1162.
- 志村芽衣・宮澤隆・矢内利政 (2012) スイング角度およびローリング角速度が打球特性に及ぼす影響 (野球のインパクトシミュレーション). *バイオメカニクス研究*, 16(3): 138-147.
- 篠塚和典 (2013) 流し打ちの極意. ベースボール・マガジン社.
- Smith, G. (1989) Padding point extrapolation techniques for the Butterworth digital filter. *Journal of Biomechanics*, 22 (8/9): 967-971.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・川村卓 (2006) 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.
- Watts, R. G. and Baroni, S. (1989) Baseball-bat collisions and the resulting trajectories of spinning balls. *American Journal of Physics*, 57 (1): 40-45.
- Williams, T. and Underwood, J. (1971) *The science to hitting*. Simon & Schuster: New York, p.42.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement* (2nd edition). John Wiley & Sons, pp.41-43.

(2017 年 1 月 17 日受付)
(2018 年 1 月 4 日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2018/2/15