

中京大学博士審査学位論文  
大学院体育学研究科

野球の打撃における左右広角への打球飛距離増大に関する研究  
～打球の回転が飛距離に及ぼす影響に着目して～

Investigation of increasing the ball flight distance toward the various  
directions in baseball hitting: effect of ball spin on the flight distance

2021年3月19日学位授与  
中京大学大学院体育学研究科体育学専攻  
中島 大貴

## 目次

関連論文 .....	i
<b>第1章 緒言</b> .....	<b>1</b>
第1節 研究の背景.....	1
第2節 文献研究.....	3
第3節 本研究の目的, 課題.....	12
<b>第2章 打球方向別の打球特性の比較および打球特性が飛距離に及ぼす影響</b>	
<b>(研究課題1)</b> .....	<b>13</b>
第1節 本章の緒言.....	13
第2節 方法.....	14
第3節 結果.....	19
第4節 考察.....	21
第5節 本章のまとめ.....	28
<b>第3章 インパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響</b>	
<b>(研究課題2)</b> .....	<b>29</b>
第1節 本章の緒言.....	29
第2節 方法.....	31
第3節 結果.....	37
第4節 考察.....	40
第5節 本章のまとめ.....	47

<b>第4章 左右広角に飛距離の大きな打球を放つための打球特性の定量化</b>	
<b>(研究課題3)</b> .....	<b>48</b>
第1節 本章の緒言.....	48
第2節 方法.....	49
第3節 結果.....	51
第4節 考察.....	54
第5節 本章のまとめ.....	57
<b>第5章 総合考察</b> .....	<b>58</b>
第1節 左右広角へ飛距離の大きな打球を放つための打球特性.....	58
第2節 打球にサイドスピン成分が加わる要因.....	60
第3節 左右広角へ飛距離の大きな打球を放つためのバットスイング.....	61
第4節 本研究の限界と今後の課題.....	62
<b>第6章 総括</b> .....	<b>64</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>66</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>69</b>

## 関連論文

本論文は、以下の学術論文をもとに構成されている。

### 【学術論文】

Hiroataka Nakashima, Gen Horiuchi, Shinji Sakurai (2018) Three-dimensional batted ball in baseball: effect of ball spin on the flight distance. *Sports Engineering* 21(4): 493-499.

(主に第2章を構成)

中島大貴, 森下義隆, 八木賢太郎, 桜井伸二 (2020) 野球の打撃におけるインパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響. *バイオメカニクス研究* 24: 8-18.

(主に第3章を構成)

中島大貴, 堀内元, 山口瑞生, 桜井伸二 (2020) 広角に大きな飛距離の打球を放つための打球特性. *野球科学研究* 4: 28-36. (主に第4章を構成)

## 第1章 緒言

### 第1節 研究の背景

野球は、我が国において最も人気の高いスポーツの一つであり、老若男女問わず幅広い人々に親しまれている。野球の試合では1チーム9名で構成された2チームが攻撃と守備とを交互に繰り返し、試合終了時点での得点を競い合う。その試合の目的について、公認野球規則には、「各チームは、相手チームより多くの得点を記録し、勝つことを目的とする」と明記されている（日本プロフェッショナル野球組織, 2019）。そのため、打者は、より多くの得点を記録し試合に勝利するために、打撃技術を向上させる必要がある。

一般に、打撃技術は打率によって評価されることが多かった。しかしながら、近年、セイバーメトリクスと呼ばれる野球のための統計学が発展し、打撃技術を評価する指標の見方にも変化がみられるようになってきた。鳥越（2014）は、プロ野球の過去30年間のデータを統計学的に分析し、長打率とチームの総得点との相関関係（ $r = 0.91$ ）は、打率とチームの総得点との相関関係（ $r = 0.81$ ）よりも強かったことを報告している。このことは、得点の可能性を高めるためには、如何に高い確率で安打を放つかよりも、如何に長打、すなわち、二塁打、三塁打、本塁打を放てるかが重要であることを意味している。

長打を放つためには、外野手の頭上を超えるような飛距離の大きなフライを放つか、外野手の間、あるいは1塁や3塁のファウルライン際を抜くような高速なゴロやライナーを放つ必要があるが、近年、フライを打ち上げた方が安打や長打になりやすいことが明らかになってきた。メジャーリーグでは、2015年にスタットキャストと呼ばれる選手やボールの動きなどのあらゆる情報を数値化するシステムが導入された。このスタットキャストによって集められたビッグデータから、速度が158km/h以上、且つ26—30°上向きに打ち出された打球の5割以上が安打となっており、そのほとんどが長打となっていることが明らかになった（mlb.com, online）。そのため、2017年には、多くの打者が安打や長打を放つ確率を高めるため、意図的にフライを打ち上げるようになり、メジャーリーグ全30球団で当時

の過去最多である 6105 本の本塁打を記録した。打者がより得点に貢献するために意図的にフライを打ち始めたことは「フライボール革命」と呼ばれ注目を集めた。このように、長打を放つためには、飛距離の大きなフライを放つことが有効であり、打者にとって飛距離の大きな打球を放つ技術を身につけることは重要である。そのため、これまでに打球飛距離の増大に関する研究が数多く行われてきた (Sawicki et al., 2003; Nathan, 2008; 城所ら, 2011)。

一方で、実際の試合では、打者は飛距離の大きな打球を放つだけでなく、投球されたボールのコースや試合の状況に応じて、左右にボールを打ち分けることも求められる (アメリカ野球指導者協会, 2011)。一般に、引っ張り方向 (右打者の場合, レフト方向) やセンター方向に比べ、流し打ち方向 (右打者の場合, ライト方向) には飛距離の大きな打球を放つことが難しいと考えられている。実際に、2019 年にメジャーリーグで放たれた全 6776 本の本塁打のうち、流し打ち方向への本塁打はわずかに 1092 本 (全体の 16%程度) であった (Baseball savant, online)。流し打ち方向への打球は、他方向への打球に比べ、ファウルライン方向にスライスすることが多い (城所と矢内, 2015)。そのため、方向別に打球の速度や回転などの打球特性が異なり、その違いが打球の飛距離に影響を及ぼしている可能性が考えられる。しかしながら、飛距離に関する先行研究のほとんどは、センター方向へ打球が飛翔することを想定しており、左右広角に放たれた打球特性について調べた研究は見当たらない。そのため、先行研究から得られた打球の飛距離を増大させるための知見が、左右広角への飛距離の増大に直接役立つかどうかは不明である。左右広角への飛距離を増大させるための知見を得るためには、まず、打球方向別に打球の飛翔軌道に影響を及ぼす打球速度や回転などの特性を明らかにし、そのうえで、飛距離を増大させるためのバットスイングなどについて検討していく必要がある。

左右広角への打球の飛距離を増大させることができれば、さらに得点の能力を高めることができる。そのため、野球において左右広角に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を明らかにすること、そして、その打球を放つためのバットスイングについて検討することは重要な研究課題である。

## 第2節 文献研究

本節では、第1項で打球の飛距離に関する研究、第2項で左右へのボールの打ち分け技術に関する研究を概観し、第3節で既存研究における問題点について整理する。

### 第1項 打球の飛距離に関する研究

野球の打者にとって、飛距離の大きな打球を放つ技術は重要である。本項では、(1) ボールの飛翔軌道に影響を及ぼす要因について概説した後、(2) 打球の飛距離に影響を及ぼす打球特性およびバットスイング特性について整理し、既存研究の問題点を取りあげる。

#### (1) ボールの飛翔軌道に影響を及ぼす要因

空中を飛翔するボールに作用する力は実質的には重力と空気力だけである。ボールに重力だけが作用する場合、発射時のボールの速度と方向から推測される2次元の放物線の通りにボールは飛翔する。この軌道から外れる変化は空気力の影響によるものである。空気力は進行方向と逆向きに働く抗力 ( $F_D$ ) と進行方向と直角の方向に働く揚力 ( $F_L$ ) に分けられる。そのうち、抗力の大きさは以下の式 (Eq. 1-1) で表される。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad \dots \quad (\text{Eq. 1-1})$$

$C_D$ は抗力係数、 $\rho$ は空気密度、 $A$ はボールの断面積、 $v$ はボールの移動速度である。抗力係数はボールの移動速度に応じて変化し、空気密度は野球の試合が行われる多くの球場ではそれほど大きな差はない。また、ボールは規定のものを使用するため、空中を飛翔するボールに作用する抗力の大きさは主にボールの移動速度によって決まる (Adair, 2002)。

一方、回転しながら移動するボールに加わる揚力は、マグナス力とも呼ばれており、回転軸ベクトルとボールの進行方向ベクトルの外積方向に作用する。その力の大きさは、以下の式 (Eq. 1-2) で表される。

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \quad \dots \quad (\text{Eq. 1-2})$$

$C_L$ は揚力係数であり、以下に示すスピンパラメータ ( $S$ , Eq. 1-3) に応じて変化することが報告されてきた (Alaways and Hubbard, 2001 ; Nathan, 2008).

$$S = r \cdot \omega / v \quad \dots \quad (\text{Eq. 1-3})$$

$r$ はボールの直径、 $\omega$ はボールの角速度(回転速度)である。しかしながら、この揚力係数とスピンパラメータの関係は、回転軸の向きが進行方向に対して直交していた場合に適用できるものであることが指摘されている(木村, 2013)。Jinji and Sakurai (2006) や Nagami et al. (2016) は、野球の投手が実際に投じたボールを調査した結果、回転軸ベクトルが進行方向に近づくほど、揚力が小さかったことを報告している。そのため、Nagami et al. (2016) は、ボールの回転を 3 成分(バックスピン成分、スパイラルスピン成分、サイドスピン成分)に分解し (Eq. 1-4)、スパイラルスピン成分を除いた 2 つの回転成分 ( $\omega_{effective}$ ) から以下のエフェクティブスピンパラメータ ( $ES_P$ , Eq. 1-5) を求め、揚力係数との関係を調べている。

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_{back} \\ \omega_{spiral} \\ \omega_{side} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (\text{Eq. 1-4})$$

$$ES_P = r \cdot \omega_{effective} / v \quad \dots \quad (\text{Eq. 1-5})$$

その結果、揚力係数は、スピンパラメータよりもエフェクティブスピンパラメータに強く依存していたことが報告されている。このように、揚力の大きさは、ボールの移動速度や回転速度に加え、回転する方向(回転成分)の影響も受ける。以上より、ボールの飛距離につい



て検討する際には、飛翔軌道に影響を及ぼす揚力の大きさや方向を正確に求めるために、ボールの回転を各成分に分解する必要がある。

## (2) 打球の飛距離に影響を及ぼす打球特性およびバットスイング特性

上述したように、飛翔中のボールに加わる力は重力と空気力（抗力、揚力）だけである。そのため、風などの自然環境的な要因を無視すれば、打球の飛距離は、バットとのインパクト直後の打球の速度、発射角度、回転、打点高といった物理的な要因によって決定される。

野球において実際に打撃されたボールを調べた先行研究では、打球の速度と飛距離との間には強い正の相関関係があることが報告されており（及川，1995；城所ら，2011），打球速度は飛距離に特に大きく影響する要因であると言える。また、発射角度について Adair（2002）は、数値シミュレーションを用いて水平面から上向きに  $35^\circ$  の発射角度で打球が放たれた場合に飛距離が最大となるが、 $30^\circ$  や  $40^\circ$  の発射角度で放たれた場合でも同程度の飛距離が期待できると報告している。さらに、打球の回転について Nathan（2008）は、同一の速度・角度で打球が発射された場合、バックスピンの回転数が多いほど上向きに作用するマグヌス力が大きくなり、打球の飛距離が大きくなることを報告している。一方で、城所ら（2011）は、実際に打撃された打球では、打球の速度と回転数はトレードオフの関係にあると報告しており、打球速度が大きく低下しない程度の適度なバックスピンをボールに加える必要があると考えられる。これらの先行研究をまとめると、打球に可能な限り大きな速度と適度なバックスピンを加え、 $30\text{—}40^\circ$  の発射角度で打ち出すことにより、飛距離を最大化できると期待される。

さらに、Sawicki et al.（2003）や城所ら（2011）は、そのような飛距離の大きな打球を放つためには、大きなバットスイング速度、且つ、インパクト直前のバットヘッドの軌道が上向きになるようなアップスイングで、ボールをインパクトすることが重要であると報告している。

このように、打球の飛距離に関する研究はいくつか行われている。しかしながら、これら

の研究はセンター方向へ飛翔した打球を分析したもの、あるいは、打球の飛翔方向に対して側方から2次元的にボールの回転（バックスピン成分のみ）を検討したものである。城所ら（2011）は、センター方向へ放たれた打球の回転はほとんどバックスピン成分で構成されていると報告している。一方で、流し打ち方向へ放たれた打球について調査した研究（城所と矢内, 2015）では、インパクト直後の打球の発射方向から予想される落下地点よりも実際の落下地点がファウルライン方向に寄っていたため、打球がスライスしていた可能性があると報告されている。つまり、これは流し打ち方向へ放たれた打球にはサイドスピン成分が含まれていたことを示唆している。

以上より、打球の特性（打球の速度、回転、飛翔軌道など）は飛翔する方向によって異なり、それが飛距離に影響を及ぼしている可能性が考えられる。しかしながら、左右広角に放たれた打球の3次元的な回転（バックスピン成分、スパイラルスピン成分、サイドスピン成分）を含む特性について調べた研究は見当たらない（問題点1）。

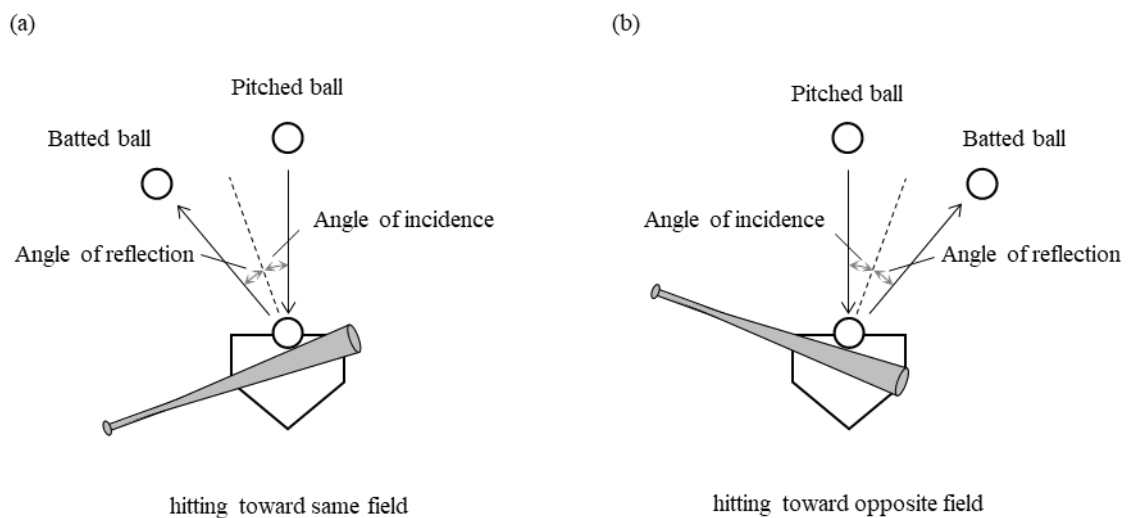
## 第2項 左右へのボールの打ち分け技術に関する研究

打者は、試合の状況や相手の守備位置、投球のコースに応じて、ボールを左右に打ち分けることが求められる。一般的に打者は、内角球は引っ張り方向へ、真ん中はセンター方向へ、外角球は流し打ち方向へ打ち返す（アメリカ野球指導者協会, 2011）。本項では、(1) 左右にボールを打ち分けるためのバットとボールのインパクトメカニズム、(2) 左右広角に飛距離の大きな打球を放つためのバットスイングについて整理し、既存研究の問題点を取り上げる。

### (1) 左右にボールを打ち分けるためのバットとボールのインパクトメカニズム

McIntyre and Pfautsch (1982) は、打撃動作を上方から撮影し、引っ張り方向と流し打ち方向への打撃動作を比較した結果、引っ張り方向と流し打ち方向へ打撃する場合は、インパクト時の水平面内でのバット長軸の向きが約  $25^\circ$  異なっていたことを報告している。具

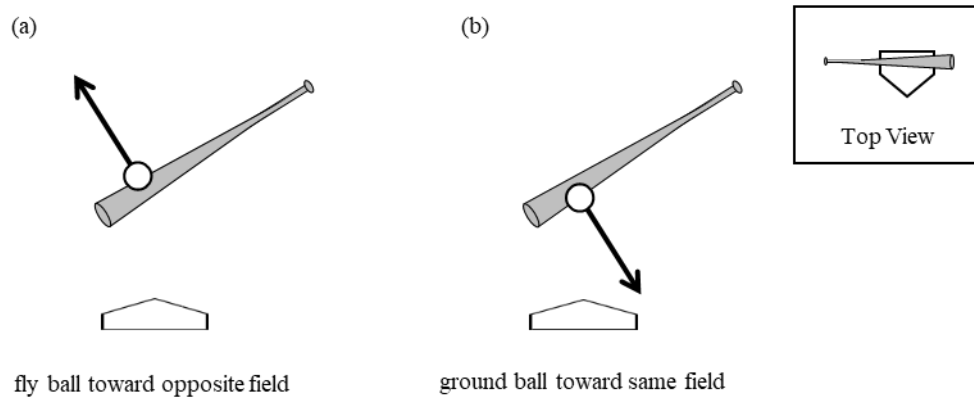
体的には、(右打者を想定した場合) 引っ張り方向へ打撃する場合はバットの投手側の面をレフト方向に、流し打ち方向へ打撃する場合はバットの投手側の面をライト方向に向けた状態でインパクトしていたことが示されている。このことから、長らく、打者は水平面内におけるバット長軸の向きを調節し、ボールを斜めに衝突させることにより入射角を生じさせ、その反射角を利用して左右への打ち分けを行っていると考えられてきた (Fig. 1-1)。



**Fig. 1-1** Diagram of hitting a ball toward (a) same field and (b) opposite field by adjusting the bat angle in the horizontal plane.

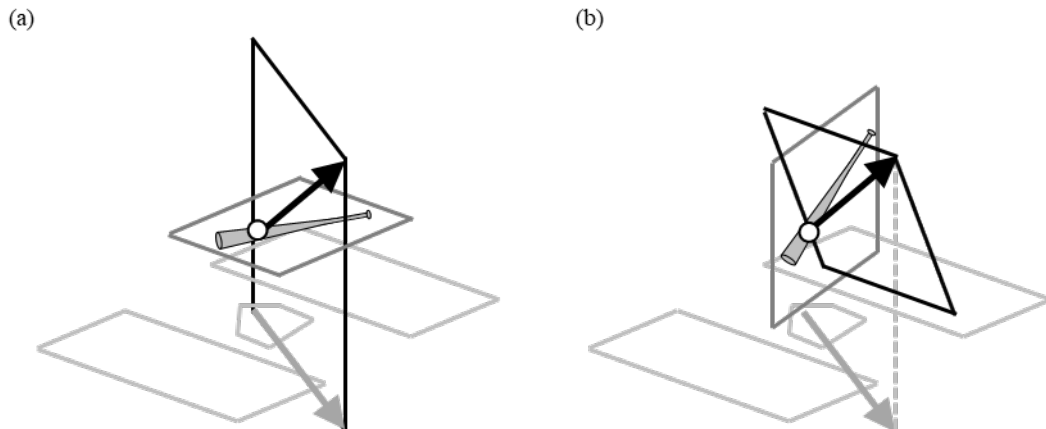
しかしながら、実際の打撃時にはバットは上下方向にも傾いており、打球の左右の飛翔方向は水平面内におけるバット長軸の向きだけでは決まらない。城所と矢内 (2015) や志村ら (2018) は、インパクト時にバットの投手側の面が引っ張り方向やセンター方向を向いていたとしても、打球が流し打ち方向へ飛翔することがあることを明らかにした。これは、バットが円柱の形状をしているためである。一般に、ボールをインパクトするとき、バットヘッドはバットグリップよりも下方に位置している。そのため、バットの投手側の面がセンタ

一方向を向いていたとしても、ボールの下側をインパクトした場合には流し打ち方向のフライに (Fig. 1-2a), ボールの上側をインパクトした場合には引っ張り方向のゴロとなる (Fig. 1-2b).



**Fig. 1-2** Batted ball direction after being hit (a) lower and (b) upper half of the balls (front view).

このように、打球の左右の飛翔方向は、水平面内でのバット長軸の向きに加えて、バットの下方への傾斜角度の大きさ、バット短軸上のボールのインパクト位置の 3 つの要素によって決まる。城所と矢内 (2017a) は、水平面上でバットの向きを調整することによる左右への打ち分けを第 1 メカニズム (Fig. 1-1), バットヘッドを下に傾斜させてボールの上側および下側を打撃することによる左右への打ち分けを第 2 メカニズム (Fig. 1-2) と定義している。実際の打撃においては、第 1 メカニズム、第 2 メカニズムが単独で打球の飛翔方向に影響を与えることは極めてまれであり、2 つの影響が反映された方向に打球が飛翔する。そのため、同一の方向に飛翔した打球であっても、インパクト時のバットの向きは同一ではなく、無数に存在する。Fig. 1-3 には異なるバットの向きから同一の方向に打球が飛翔する一例を示した。



**Fig. 1-3** Diagram of hitting a ball same direction from different bat angles.

上述したように、同一の方向に飛翔した打球であっても、インパクト時のバットの向きは無数に存在するため、左右広角に高速な打球を放つには、どのようなバットの向きでボールをインパクトすればよいのかという疑問が生じる。城所と矢内（2017a）は、打球の飛翔する方向への第1メカニズム、第2メカニズムのそれぞれの貢献度の大きさと打球速度の関係について調査した結果、第2メカニズムの貢献角が小さいほど、打球速度が大きくなる傾向があったことを報告している。すなわち、インパクトのタイミングを調整し、第1メカニズムが優位な打ち分けを行うことにより、高速な打球を放つことが期待できる。

## (2) 左右広角に飛距離の大きな打球を放つためのバットスイング

前項において、飛距離を増大させるためには、大きなバットスイング速度、且つ、アップスイングでボールをインパクトすることが重要であることを概説した（Sawicki et al., 2003；城所ら，2011）。以下に、打球方向別のバットスイング速度とスイング軌道について整理し、それらが飛距離に及ぼす影響について検討する。

森下と矢内（2018）は、引っ張り方向と流し打ち方向への打撃時の動作を比較し、高速な

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討している。その結果、引っ張り方向へ打撃する場合はアッパースイングで、流し打ち方向へ打撃する場合はダウンスイングでボールをインパクトしていたことが報告されている。このことから、流し打ち方向に比べ、引っ張り方向へ打撃する場合、飛距離の大きな打球を生み出しやすいスイング軌道であると言える。加えて、引っ張り方向へ打撃する場合、流し打ち方向に比べ、より投手側でボールをインパクトしていたことも報告されている。また、森下ら（2019）は、より投手側でボールをインパクトするほど、バットスイング速度は大きくなることを報告している。左右に打ち分けを行った際のバットスイングを調べた研究では、引っ張り方向と流し打ち方向への打撃時のバットスイング速度に統計的な有意差が認められたもの（城所と矢内，2017a；光川ら，2018）と統計的な有意差が認められなかったもの（森下と矢内，2018）があるが、実際の数値を見るといずれの研究においても、引っ張り方向が流し打ち方向に比べ大きい値を示していた。そのため、バットスイング速度の大きさから見ても、流し打ち方向よりも、引っ張り方向の方が飛距離の大きな打球を放ちやすいと言える。

このように左右の打球の飛翔方向別にインパクト時のバットスイング速度やスイング軌道は異なり、流し打ち方向へは、引っ張り方向に比べ、飛距離の大きな打球を放つことが難しいことが推察された。しかしながら、城所と矢内（2017a）は、飛距離に最も影響を及ぼす打球速度について、引っ張り方向と流し打ち方向の間に、統計的な有意差はなかったと報告している。具体的な数値を見ると、引っ張り方向に比べ、流し打ち方向に放たれた打球速度は小さい値を示しているが、2019年のメジャーリーグの全本塁打のうち、流し打ち方向に放たれた本塁打がわずか16%程度しかなかった（Baseball savant, online）ことを考慮すると、やはり前項で問題点1として取り上げた打球のサイドスピン成分を含めた打球速度以外の打球特性の違いが飛距離に影響を及ぼしている可能性が考えられる。サイドスピンしながら飛翔する打球は、横向きに飛翔軌道が変化するため、飛距離が短くなることも考えられる。そのため、左右広角、特に飛距離の大きな打球を放つことが難しいと考えられる流し打ち方向への飛距離を増大させるためには、スイング速度の増大、スイング軌道の改善に

加え、サイドスピン成分の少ない打球を放つことが求められる可能性も考えられる。

一般に、実践現場において、バットヘッドが大きく下方に傾斜した状態でインパクトした場合、すなわち、第2メカニズムが優位な打撃を行った場合、打球にサイドスピンの加わると考えられている（古田，2010；池田，2019）。しかしながら、実際にインパクト時のバットの向きが打球の回転に影響を及ぼすか否かは明らかにされていない（問題点2）。

### 第3項 既存研究における問題点

ここまで示した既存研究における問題点は以下のようにまとめられる。

- (1) 左右広角に放たれた打球の3次元的な回転（各回転成分）を含む打球特性やその特性が飛距離に及ぼす影響について明らかにされていない。
- (2) インパクト時のバットの向きの違いが打球の回転に影響を及ぼすか否かについては明らかにされていない。

これらの問題点を解決することができれば、左右広角に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性やバットスイング特性について検討することが可能になるだろう。

### **第3節 本研究の目的, 課題**

#### **第1項 本研究の目的**

本研究では、野球において、左右広角に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を明らかにし、その打球を放つためのバットスイング特性について検討することを目的とした。

#### **第2項 本研究の課題**

上記の目的を達成するために、本研究では、以下の3つの研究課題を設定した。

##### **【研究課題1】**

左右広角に放たれた打球の方向別（引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向）の特性を明らかにし、その特性が飛距離に及ぼす影響を明らかにすること。

##### **【研究課題2】**

インパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響を明らかにし、打者が打球の回転を制御できるか否かを検討すること。

##### **【研究課題3】**

研究課題1, 2の結果を踏まえて、打球方向別に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を明らかにすること。



## 第2章 打球方向別の打球特性の比較および打球特性が飛距離に及ぼす影響（研究課題1）

### 第1節 本章の緒言

相手より多くの得点を記録し試合に勝利するために、打者は打撃技術の向上が求められる。中でも、長打を放つ技術、一般に、飛距離の大きな打球を放つ技術を身につけることが重要である（鳥越，2014）。

Sawicki et al. (2003) や城所ら (2011) は、飛距離の大きな打球を放つためには、大きな速度とバックスピンをボールに加える必要があることを報告している。しかしながら、これらの研究はセンター方向へ飛翔した打球を分析したもの、あるいは、打球の飛翔方向に対して側方から2次元的にボールの回転（バックスピン成分のみ）を検討したものである。

実際の試合においては、状況や相手の守備位置、投球のコースに応じて、打球を左右に打ち分けることも求められる（アメリカ野球指導者協会，2011）。2019年にメジャーリーグで放たれた全6776本の本塁打を打球方向別にみると、流し打ち方向への本塁打は1092本と全体のわずか16%程度であり（Baseball savant, online）、打球方向別に飛距離の大きさが異なることが考えられる。また、城所ら (2011) は、センター方向へ放たれた打球の回転は、ほとんどバックスピン成分で構成されていると報告している。一方で、城所と矢内 (2015) は、流し打ち方向へ放たれた打球には、サイドスピン成分が加わっていたことを示唆している。以上のことから、打球方向別に打球の回転などの打球特性が異なり、飛距離に影響を及ぼしている可能性が考えられる。しかしながら、打球の3次元的な回転（回転成分）を含む特性について調べた研究はない。左右広角に放たれた打球の特性、およびその特性と飛距離の関係性を明らかにすることができれば、左右広角に飛距離の大きな打球を放つための基礎的な知見となると考えられる。

そこで、本章の目的は、引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向に放たれた打球特性を明らかにし、その特性が飛距離に及ぼす影響について検討することとした。

## 第2節 方法

### 第1項 分析対象者

分析対象者は、大学硬式野球部に所属する右打者 6 名（身長： $1.78 \pm 0.02\text{m}$ ，体重： $75.7 \pm 3.7\text{kg}$ ，年齢： $20.5 \pm 0.3$  歳）であった。実験の実施にあたり、中京大学倫理審査委員会の承認を得た。また、分析対象者には実験の実施前に本研究の趣旨を詳細に説明し、本研究への参加について書面による同意を得た。

### 第2項 実験試技

実験は4日間にわたり、屋外の野球場（両翼：91.4m，中堅：120m）で行った。なお、野球場の標高は97.9mであり、4日間の平均気温は $25.7 \pm 7.0^\circ\text{C}$ ，平均湿度は $38.3 \pm 5.9\%$ ，平均推定気圧は $1005.1 \pm 7.6\text{hPa}$ であった。

分析対象者には十分なウォーミングアップを行わせた後、ピッチングマシンから投球されるボールを打撃させた。その際、できる限り遠くへ打球を飛ばすように指示を与えた。このうち、打球飛距離が60m以上、且つフェア地域内に放たれた全ての打球を成功試技とした。さらに、フェア地域を3塁側ファウルラインからフェア地域側へ $30^\circ$ の範囲（引っ張り方向：Same field），センターラインを中心に左右各 $15^\circ$ の範囲（センター方向：Center field），1塁側ファウルラインからフェア地域側へ $30^\circ$ の範囲（流し打ち方向：Opposite field）の3方向に分けた（Fig. 2-1）。各分析対象者にはそれぞれの方向へ5試技ずつ成功試技が得られるまで実験を行わせた。なお、ピッチングマシンはマウンドの投手板の約1.5m前方に設置し、ストライクゾーンの中央付近に硬式野球ボールが投射されるように調整した。試技に使用するボールの表面には、ボールの回転を求めるための約100個のポイントを描いた。また、各分析対象者には硬式用木製バット（長さ：0.84m，質量：0.9kg）を使用させた。

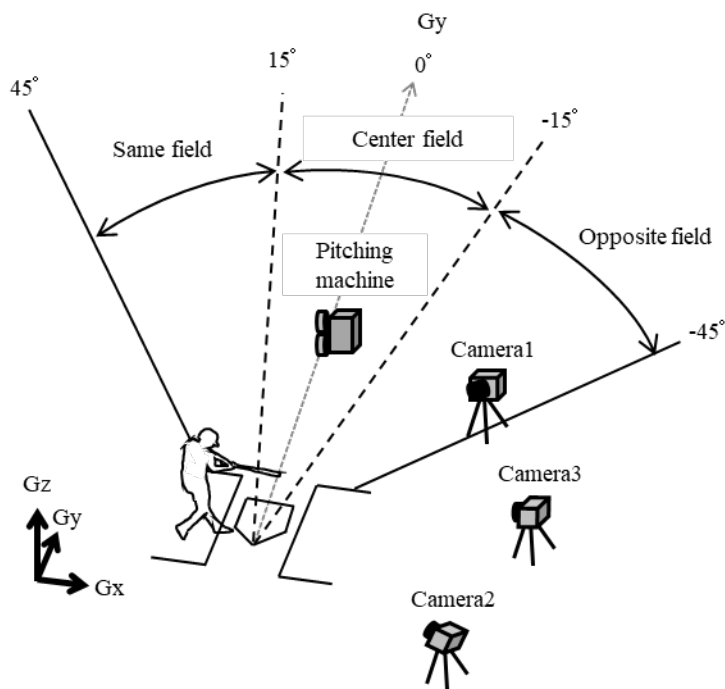


Fig. 2-1 Experimental setup and the definition of the global coordinate system and each field.

### 第3項 データ収集

インパクト前後のボールは3台の高速度ビデオカメラ（Phantom Miro, Vision Research社製）を用いて撮影した。

ボールの位置や方向，速度を算出するため，2台のカメラ（Fig. 2-1；Camera 1, 2）をホームベースから投手方向を向き，右斜め前方および右斜め後方に設置し，撮影速度500fps，シャッタースピード1/20000sで撮影を行った。2台のカメラの映像は，バットとボールがインパクトする瞬間を基準に，時間的に同期した。試技の撮影の前に，3次元空間を構築するためキャリブレーションを行った。キャリブレーションポール（高さ2.4mで0.2mごとに色の異なるポール）を撮影範囲の6か所（右バッタースボックスの4つの角および左バッタースボックスのホームベース側の長辺の両端）に垂直に立て，順に撮影した。なお，静

止座標系は、捕手から投手へ向かう方向を Gy 軸、鉛直上方向を Gz 軸、Gy 軸と Gz 軸の外積方向を Gx 軸と定義した。

ボールの回転数および回転成分を算出するため、1 台のカメラ (Fig. 2-1 ; Camera 3) を 1 塁方向に設置し、撮影速度 1000fps, シャッタースピード 1/20000s で撮影を行った。このとき、カメラの光軸とバッタースボックスの投手側のラインが平行になるようにカメラの位置を調節し、インパクト直後の打球が画面上に大きく映るように設定した。

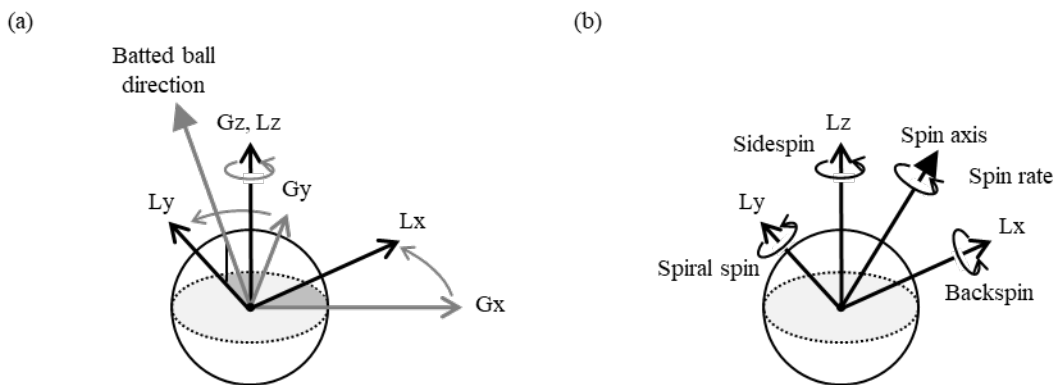
打球の落下地点の特定には、巻き尺と測量用機器のトランシットを用いた。さらに、風が打球の飛距離に及ぼす影響を考慮するため、2 塁ベース上の高さ 0.5m の地点のホームプレートからセンター方向の風速を試技ごとに計測し、風速が $\pm 1.5\text{m/s}$  以上を記録した試技は分析対象から除外した。なお、追い風を正の値、向かい風を負の値で示した。

#### 第 4 項 データ処理

撮影した映像を PC に取り込み、デジタルソフト (Frame-DIAS V, ディケイエイチ社製) を用いて分析した。Camera 1 および Camera 2 より得られた映像から、バットとのインパクト前後 5 コマのボール中心をデジタル化し、3 次元 DLT 法によりボールの 3 次元座標を取得した。得られたボール中心の 3 次元座標から、投球および打球の速度、打点高、発射角度 (打球上下角, 打球左右角) を求めた。投球および打球の速度は、インパクト直前、直後のボール中心座標の変位を時間微分することにより算出した。打点高 (Impact height) はインパクト時の z 座標とした。打球上下角 (Launch angle) は、打球の初速度ベクトルと水平面とのなす角度とし、打球の初速度ベクトルが上向きの場合を正の値で示した。打球左右角 (Spray angle) は、打球の初速度ベクトルを水平面に投影したベクトルと Gy 軸とのなす角度とし、上方から見て Gy 軸よりも打球の初速度ベクトルが反時計回り方向を向いている場合を正の値として示した。さらに、水平面内での打球の軌道の変化を定量化するため、スライス角を算出した。スライス角 (Slice angle) は、ホームプレートの突端から落下地点を結ぶ線分と初速度ベクトルを水平面に投影したベクトルのなす角とした。上方から見て、

初速度ベクトルがホームプレートの突端と落下地点を結んだ線分よりも時計回りの方向を向いている場合を正の値で示した。

Camera 3 より得られたバットとのインパクト後のボールの映像から、インパクト直後とその5コマ後のボールの上下左右の端、およびボール表面のマークを手動でデジタル化し、画面上での座標値を取得した。その後、Jinji and Sakurai (2006) の方法を用いて、打球の回転数および回転成分（バックスピン成分、スパイラルスピン成分、サイドスピン成分）を求めた。ここで得られた回転成分は静止座標系においての値であるため、以下のボール移動座標系に変換を行うことにより、打球の飛翔した方向に則した回転成分を算出した (Winter, 2009 ; Fig. 2-2a)。ボール移動座標系は、ボール中心を原点とする右手座標系であり、水平面内での打球の初速度ベクトルを  $L_y$  軸、鉛直上向きを  $L_z$  軸、 $L_y$  軸と  $L_z$  軸との外積方向を  $L_x$  軸と定義した。なお、打球の回転数 (Spin rate) は回転軸周り、バックスピン成分 (Backspin) は  $L_x$  軸周り、スパイラルスピン成分 (Spiral spin) は  $L_y$  軸周り、サイドスピン成分 (Sidespin) は  $L_z$  軸周りの1秒間あたりの回転数とした (Fig. 2-2b)。



**Fig. 2-2** Diagram of (a) converting the coordinates into the local coordinate system and (b) the definition of the spin rate and spin components.

## 第 5 項 統計処理

打球方向別の算出項目の比較には、一元配置分散分析および多重比較検定(Bonferroni 法)を用いた。この際、有意水準は 5%未満とした。なお、分析には統計処理ソフト(SPSS Statistic ver.23.0, IBM 社製)を用いた。

### 第3節 結果

撮影した全 116 試技のうち，①風速が $\pm 1.5\text{m/s}$ 以上を計測した試技，②打球が画角内に収まらなかった試技，③デジタイズ点が明瞭に確認できなかった試技を除いた 81 試技（引っぱり方向：25 試技，センター方向：30 試技，流し打ち方向：26 試技）を分析した．なお，外野フェンスを越えた打球が 2 試技あり，それらの落下位置は特定できなかったため，飛距離は 125m と推定した．また，それらのスライス角は算出できなかった．

打球方向別の投球速度，打点高，風速の平均値と標準偏差を Table 2-1 に示した．投球速度，打点高，風速のいずれにおいても 3 方向間に有意な差は認められなかった．打球飛距離，打球速度，打球上下角，スライス角の平均値と標準偏差を Table 2-2 に示した．打球飛距離は流し打ち方向が他方向に比べ有意に小さかった．打球速度，打球上下角は 3 方向間に有意な差は認められなかった．スライス角は 3 方向間で有意な差が認められた．Table 2-3 に打球の回転数および各回転成分の平均値と標準偏差を示した．打球の回転数は流し打ち方向が他方向に比べ有意に大きかった．バックスピン成分は 3 方向の間に有意な差は認められなかった．スパイラルスピン成分は，引っぱり方向と流し打ち方向との間に有意な差が認められた．サイドスピン成分は，3 方向の間に有意な差が認められた．

**Table 2-1** Comparison of the experimental conditions.

	Pitched ball velocity [m/s]	Impact height [m]	Wind velocity [m/s]
Same field	23.9 $\pm$ 1.7	0.84 $\pm$ 0.13	0.0 $\pm$ 0.7
Center field	24.3 $\pm$ 1.3	0.87 $\pm$ 0.13	0.1 $\pm$ 0.6
Opposite field	23.7 $\pm$ 1.4	0.81 $\pm$ 0.13	-0.2 $\pm$ 0.6
ANOVA	N.S.	N.S.	N.S.

*Notes: N.S. shows that the statistically significant difference was not observed.*

**Table 2-2** Comparison of the kinematic parameters of the batted ball.

	Flight distance	Batted ball velocity	Launch angle	Slice angle
	[m]	[m/s]	[deg.]	[deg.]
Same field	88.8 ± 14.1	37.7 ± 3.5	33.2 ± 11.8	3.2 ± 5.1
Center field	89.1 ± 17.1	38.2 ± 3.9	30.4 ± 12.3	-3.2 ± 3.4
Opposite field	79.2 ± 6.9	36.5 ± 2.3	28.6 ± 10.4	-9.5 ± 2.5
ANOVA	B, C	N.S.	N.S.	A, B, C

*Notes: N.S. shows that the statistically significant difference was not observed. A, B, C show that the statistically significant difference was observed between same field and center field, between same field and opposite field, and between center field and opposite field, respectively.*

**Table 2-3** Comparison of the spin rate and components of the batted ball.

	Spin rate	Backspin	Spiral spin	Sidespin
	[rps]	[rps]	[rps]	[rps]
Same field	35.8 ± 12.7	30.9 ± 16.7	0.7 ± 8.7	5.3 ± 11.1
Center field	32.9 ± 14.2	29.4 ± 14.1	4.5 ± 5.0	-10.1 ± 9.1
Opposite field	46.0 ± 11.2	30.4 ± 13.0	7.0 ± 7.9	-31.7 ± 6.4
ANOVA	B, C	N.S.	B	A, B, C

*Notes: N.S. shows that the statistically significant difference was not observed. A, B, C show that the statistically significant difference was observed between same field and center field, between same field and opposite field, and between center field and opposite field, respectively.*



## 第4節 考察

### 第1項 実験条件について

はじめに、本研究の実験条件について以下に考察する。打球方向別の実験条件が同じであったことを確認するため、投球速度、打点高（投球の高さ）、風速を比較した（Table 2-1）。その結果、いずれにおいても3方向間に有意な差は認められなかった。そのため、本研究における打球方向間の打球特性の違いは、実験環境や投球の条件の差異に起因するものではないと考えられる。

### 第2項 打球方向別の飛距離および打球特性の比較、打球特性と飛距離の関係について

打球方向別の飛距離および打球特性を比較し、打球方向別に飛距離が異なる要因について以下に検討する。

打球の飛距離は、流し打ち方向が他方向に比べ有意に小さかった。バットとボールのインパクト後の打球に加わる力は重力と空気力のみであるため、打球の飛距離は物理的には打球の初期条件（打球速度、打球上下角、回転、打点高）によっておおよそ決定される。さらに、空気力がないと仮定し重力のみが打球に加わるとすると、打球の飛距離は打球速度、打球上下角、打点高により決定される。しかしながら、打球速度、打球上下角、打点高のいずれにおいても3方向間に有意な差は認められなかった。つまり、流し打ち方向と他方向の打球飛距離の違いは、空気力の影響により生まれたものであると考えられる。

打球に加わる空気力は、抗力（空気抵抗）と揚力（マグヌス力）に分けられる。空気抵抗とはボールの進行方向と逆向きに働く力のことであり、その大きさは主にボールの移動速度によって決定されるが、本研究において、3方向間の打球速度に有意な差は認められなかったため、3方向間の空気抵抗の大きさに差はなかったと考えられる。一方、マグヌス力とはボールの進行方向と回転軸の両方に直交する方向に働く力であり、その力の大きさは一般にボールの移動速度と回転速度に比例する。本研究において、3方向間の打球速度に差は認められなかったが、流し打ち方向と他方向の間の回転数に有意な差が認められた。そのた

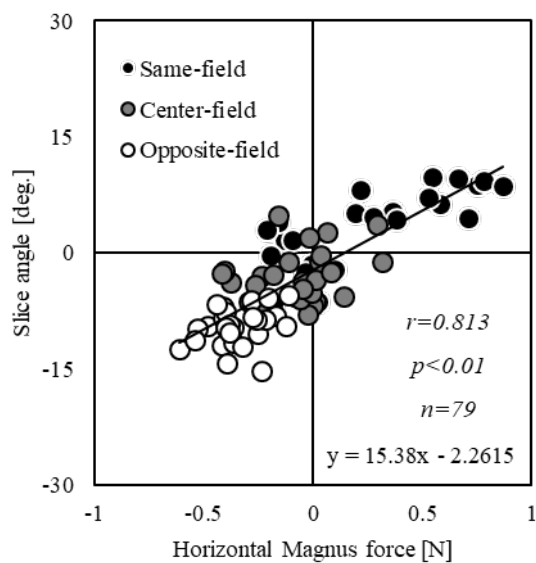
め、打球に加わるマグナス力の違いによって、打球飛距離に差が生じた可能性が考えられる。

打球に加わるマグナス力の大きさおよび方向を検討するため、打球の回転をバックスピ  
ン成分、スパイラルスピン成分、サイドスピン成分の3成分に分解した。まず、バックスピ  
ン成分は3方向間に有意な差は認められなかった。バックスピンをしながら飛行する球体  
には上向きのマグナス力が働くが、その大きさは3方向で同程度であったと推察される。

次に、スパイラルスピン成分は引っ張り方向と流し打ち方向の間に有意な差が認められ  
た。しかしながら、スパイラルスピンをしながら飛行する球体にはマグナス力は働かない。  
溝田ら(2009)は、スパイラルスピンをするボールに加わる空気力を調査した結果、ボール  
の進行方向と回転軸の向きが完全に一致した状態でボールが飛行する場合にのみ、ボール  
に加わる空気抵抗が小さくなったことを報告している。しかし、本研究において打球の進行  
方向と回転軸の向きが完全に一致した試技はなかったため、引っ張り方向と流し打ち方向  
で空気抵抗の大きさに差があったとは言い難い。また、スパイラルスピン成分は他の成分と  
比べ明らかに小さかったため、打球の飛距離に及ぼす影響は小さいと考えられる。したがっ  
て、流し打ち方向への打球の飛距離が小さかった原因を、スパイラルスピン成分の違いから  
説明することはできない。

最後に、サイドスピン成分は3方向全ての間にも有意な差が認められた。しかしながら、引  
っ張り方向の平均値が正の値を示したのに対し、センター方向、流し打ち方向の平均値は負  
の値を示したため、絶対値にて比較を行った。サイドスピン成分の絶対値における平均値は、  
引っ張り方向が  $9.4 \pm 7.7$ rps、センター方向が  $11.0 \pm 7.9$ rps、流し打ち方向が  $31.7 \pm 6.4$ rps  
であり、流し打ち方向が他方向に比べ有意に大きかった。サイドスピンをしながら飛行する  
球体には横向きのマグナス力が働くため、流し打ち方向への打球は横向きに大きなマグス  
ス力を受け、飛翔軌道が大きく横向きに変化していた可能性が考えられる。そこで、Sawicki  
et al. (2003) が示した揚力係数を用いて、打球の初期条件から横向きに働くマグナス力を  
推定した。その結果、引っ張り方向は  $0.36 \pm 0.27$ N、センター方向は  $0.37 \pm 0.23$ N、流し打  
ち方向は  $0.83 \pm 0.19$ N のマグナス力が働いており、流し打ち方向への打球は他方向に比べ

有意に大きな力を受けていることが推察された。そして、実際にどの程度飛翔軌道が変化していたのかについてスライス角を調べると、3方向間に有意な差が認められた。しかしながら、スライス角においても、引っ張り方向の平均値が正の値を示したのに対し、センター方向、流し打ち方向の平均値は負の値を示したため、絶対値にて比較すると、引っ張り方向が  $5.3 \pm 2.9^\circ$ 、センター方向が  $4.1 \pm 2.2^\circ$ 、流し打ち方向が  $9.5 \pm 2.5^\circ$  であり、流し打ち方向が他方向に比べ有意に大きかった。実際に、マグナス力によって、飛翔軌道が変化したのかを確認するため、両者の関係を調べると、有意な相関関係が認められた (Fig. 2-3,  $r = 0.81$ ,  $p < 0.01$ )。以上より、流し打ち方向へ放たれた打球は、サイドスピン成分が多く、大きな横向きマグナス力を受け、飛翔軌道が大きく変化した結果、打球の飛距離（落下地点までの直線距離）が短くなったと考えられる。



**Fig. 2-3** Relationship between the magnitude of Magnus force in horizontal direction and the slice angle of the batted ball.

### 第3項 打球の飛翔方向とサイドスピン成分の関係について

前項において、打球方向別にサイドスピン成分が異なり、特に流し打ち方向への打球にはサイドスピン成分が多く、横向き大きなマグヌス力を受け、打球の飛翔軌道が変化するため、飛距離が短くなることが明らかになった。本項では、打球の飛翔方向とサイドスピン成分について、さらに詳細に考察する。

打球左右角とサイドスピン成分との間には有意な相関関係が認められた (Fig. 2-4)。打球左右角が約  $15^\circ$ ，すなわち、引っ張り方向とセンター方向の間 (右打者の場合、左中間) を境に回転の方向が変わっている。引っ張り方向への打球は上方から見て反時計回りに、センター方向、流し打ち方向への打球は上方から見て時計回りに回転しており、引っ張り方向とセンター方向の間から左右に離れた方向に打撃するほど、サイドスピン成分が大きくなっている。このことから、流し打ち方向に限らず、右打者の場合、3塁側ファウルライン際への打球など左中間から左右に離れた方向に放たれた打球は、大きな横向きのマグヌス力を受け、横向きに飛翔軌道が変化するため、飛距離が短くなると考えられる。

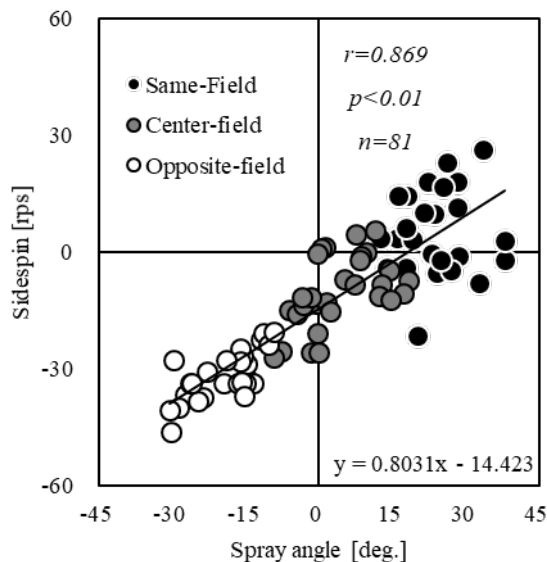


Fig. 2-4 Relationship between spray angle and sidespin of the batted balls.

次に、打球にサイドスピン成分が加わる要因について検討する。打球のサイドスピン成分は、バットに対する投球の方向と打球が飛翔していく方向，すなわち，入射角と反射角の影響を受けると考えられる。そのため，右打者におけるバットとボールのインパクトを上方から見て 2 次元的に考えた場合，引っ張り方向への打球には上方から見て反時計回りのサイドスピン成分が，流し打ち方向への打球には上方から見て時計回りのサイドスピン成分が加わり，センター方向への打球にはサイドスピン成分は加わらないと考えられる (Fig. 2-5)。以上の理由から，打球左右角とサイドスピン成分との間に有意な相関関係が認められたと考えられる。

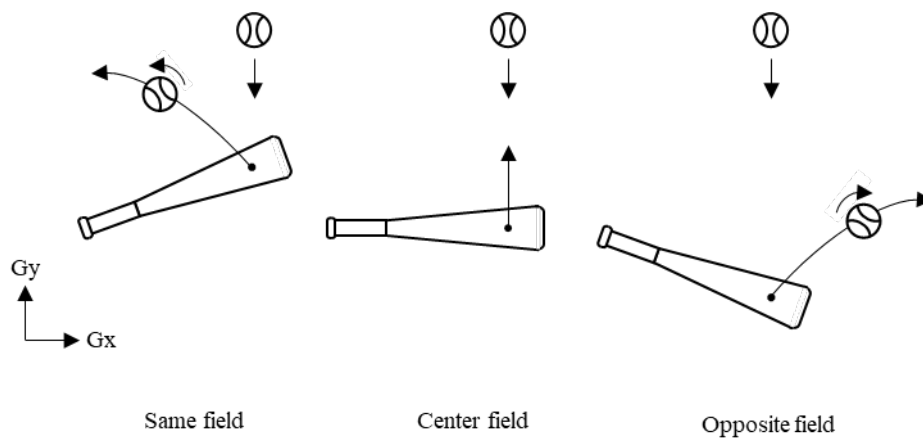


Fig. 2-5 Diagram of the mechanism in which the bat imparts sidespin to the ball.

しかしながら，実際には，引っ張り方向とセンター方向の中間付近を境にサイドスピン成分の向きが変わっており，センター方向への打球にもサイドスピン成分が加わっていた。これには，インパクト時のバットの向きとバットのインパクト位置の速度ベクトルが影響していると考えられる。通常打者は，ボールをインパクトする際にバットヘッドをバットグリップよりも下方に傾斜させている。また，バットとのインパクト時にはボールが潰れることがわかっている。右打者が，センター方向，且つ上向きに打球を放つ場合，ボールの中心のやや下をインパクトすることになるが，実際のバットとボールは点ではなく面で接触する。

この場合、その面は、ボールの中心の下側、且つ打者側の一定の範囲である。さらに、バットはボールとの接触中にセンター方向へ動いているため、上方から見て時計回りにボールを回転させる力が作用すると考えられる。以上の理由から、センター方向へ飛翔した打球であってもサイドスピン成分が加わり、引っ張り方向とセンター方向の中間付近を境にサイドスピン成分の向きが変わったと考えられる。

#### 第4項 左右広角への打球の飛距離を増大させる方法と今後の課題について

本項では、左右広角への打球の飛距離を増大させる方法について検討する。前項において、引っ張り方向とセンター方向の中間を境に左右に離れた方向に打球が放たれるほど、打球のサイドスピン成分が大きくなり、横向きに飛翔軌道が変化するため飛距離が短くなる可能性が示唆された。そのため、左右広角への飛距離を増大させるためには、打者はさらに打球速度を増大させるか、打球のサイドスピン成分を減らして打球を直線的に飛ばす必要があると考えられる。

打球速度を増大させるためには、バットスイング速度の増大が必須である。これまで、バットスイング速度を増大させるための研究は数多く行われてきた。これらの研究を参考に打者は日々バットスイング速度を増大させるためのトレーニングを行う必要があるだろう。また、本研究では、3方向間の打球速度に統計的な有意差は認められなかったが、流し打ち方向は他方向に比べわずかに小さい値を示した。本研究において、流し打ち方向への飛距離が短くなる要因は、打球のサイドスピン成分に起因すると考察してきたが、打球速度のわずかな差も飛距離の差に影響を及ぼしている可能性がある。城所と矢内(2017a)は、バットスイング速度は、流し打ち方向が他方向に比べ小さかったことを報告している。これは、流し打ち方向へ打撃する場合、スイング開始からインパクトまでのバットの加速距離を長く獲得できないためであると考えられる。このことから、流し打ち方向へは他方向に比べ、速度の大きい打球が放ちづらいスイングになっていると言える。そのため、流し打ち方向への飛距離を増大させるためには、テイクバックを大きく取り、インパクトまでに十分にバット

を加速させることも重要になるだろう。

一方で、打球のサイドスピン成分を減らす方法については、指導現場では、バット長軸をできる限り水平に保った状態でボールをインパクトすることが重要であると考えられている（古田，2010；池田，2019）。しかしながら、実際にインパクト時のバットの向きやバットの動きと打球のサイドスピン成分の関係について調べた研究はない。今後、どのようにボールをインパクトすることで、打球のサイドスピン成分を減らすことができるのかについて検証する必要がある。この点について、第3章にて検証を行う。

## 第5項 本研究の限界

本研究では、風が飛距離に及ぼす影響を考慮し、 $\pm 1.5\text{m/s}$ 以上の風速を記録した試技を分析対象から除外した。しかしながら、Sawicki et al. (2003)は、数値シミュレーションを用いて風が打球の飛距離に与える影響について検討し、風速が追い風方向に $1.0\text{m/s}$ 増加すると打球の飛距離が約 $2.1\text{m}$ 増加し、向かい風方向に $1.0\text{m/s}$ 増加すると約 $2.1\text{m}$ 減少すると報告している。そのため、本研究により得られた打球の飛距離は、計測地点（高さ $0.5\text{m}$ ）とボールが飛行する上空の風速が同じであると仮定すると、風による誤差が最大でおよそ $3\text{m}$ 含まれている可能性が考えられる。

## 第5章 本章のまとめ

本研究では、大学野球選手 6 名にピッチングマシンから投射されるボールをできる限り遠くへ打撃させ、打球方向別（引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向）の飛距離や打球特性を比較し、打球特性が飛距離に及ぼす影響について検討した。その結果は、以下のようによまとめられる。

- 1) 流し打ち方向へ放たれた打球の飛距離は、他方向に比べ小さかった。一方で、3 方向間の打球速度、打球上下角、バックスピン成分に有意な差は認められなかった。
- 2) 流し打ち方向へ放たれた打球は、他方向への打球に比べ、サイドスピン成分が多く、横向きの大きなマグヌス力を受けたため、飛翔軌道が横向きに大きく変化し、飛距離（落下地点までの直線距離）が短くなったことが示唆された。
- 3) 流し打ち方向に限らず、引っ張り方向とセンター方向の間を境に左右に離れた方向に打球が飛翔するほど、サイドスピン成分が多くなることも明らかになり、引っ張り方向のファウルライン際への打球なども、飛距離が短くなりうるということが示唆された。

以上のことから、左右広角への飛距離を増大させるためには、打者はさらに打球速度を増大させるか、打球のサイドスピン成分を減らして打球を直線的に飛ばす必要があることが示唆された。



### 第3章 インパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響（研究課題2）

#### 第1節 本章の緒言

第2章において、左右広角への打球の飛距離を増大させるためには、打者はさらに打球速度を増大させるか、打球のサイドスピン成分を減らして打球を直線的に飛ばす必要があることが示唆された。本章では、打者が打球のサイドスピン成分を減らし、左右広角に直線的な打球を飛ばすことが可能かどうかについて検証する。

これまで、野球においてサイドスピン成分を含めた3次元的な打球の回転を決定するバットとボールの衝突メカニズムは明らかにされていない。打球の3次元的な回転に影響を及ぼす要因として以下の3つが考えられる。1つ目は投球の回転、2つ目はインパクト中のバットの動き、3つ目はインパクト時のバットの向きである。このように打球の回転には複数の要因が影響を及ぼしていると考えられるため、実際に投球されたボールを打者が打撃したデータから特定の要因を抽出することは極めて難しいと推察される。そのため、これまでに2次元的な打球の回転に影響を及ぼす要因を調べた研究においても、特定の要因を取り除いた条件下で実験を行っている。例えば、Kensrud and Smith (2013) は、ティー台に置かれたボールをスイングマシンに打撃させ、スイング軌道の違いなどが結果に及ぼす影響を取り除いた上で、インパクト位置やスイング速度と打球の回転の関係について調べている。また、Nathan et al. (2012) は、固定したシリンドラーに向けてピッチングマシンからボールを発射させ、インパクト中のバットの動きが結果に及ぼす影響を取り除いた上で、ボールとバットの衝突位置と衝突後の打球の回転の関係について調べている。

このように、打球の回転に影響を及ぼす要因について検討する場合、いくつかの要因を取り除いた上でひとつずつ明らかにしていく必要があると考えられる。先行研究において、投球の回転が打球の回転に及ぼす影響は極めて小さいことが報告されている (Nathan et al., 2012; 中島と桜井, 2019)。また、インパクト時のバットとボールの接触時間は約0.001秒と非常に短い (Cross, 2011) ことから、インパクト中のバットの動きが打球の回転に及ぼす

影響は比較的小さいと考えられる。そこで本研究では、まず、打球の回転への影響度が大きいと考えられるインパクト時のバットの向きに着目する。

一般に、インパクト時のバット長軸の下方への傾斜角度の大きさは打球の回転に影響を及ぼすと考えられている。Adair (2002) は、ゴルフのスイングのようにバットを下向きに大きく傾斜させて打撃したときの打球の回転は、バットを水平に保って打撃したときとは異なると述べている。また、実践現場においても、流し打ち方向へ打撃する際に、サイドスピンの成分が加わってしまうのはバットヘッドが下方に傾斜しているからであると考えられている (古田, 2010 ; 池田, 2019)。

そこで本研究では、インパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 第2節 方法

### 第1項 実験手順

本実験は6日間にわたり、屋内野球練習場にて行った。エアー式ピッチングマシン（TOPGUN, 共和技研社製）から投射される硬式野球ボールを、固定した硬式用の竹製バット（League Champ Bamboo, エスエスケイ社製, 長さ: 0.84 m, 質量: 0.9 kg）に衝突させた (Fig. 3-1)。なお, 使用したボールの表面には, 回転を求めるための約100個のデジタル用のマークを描いた。

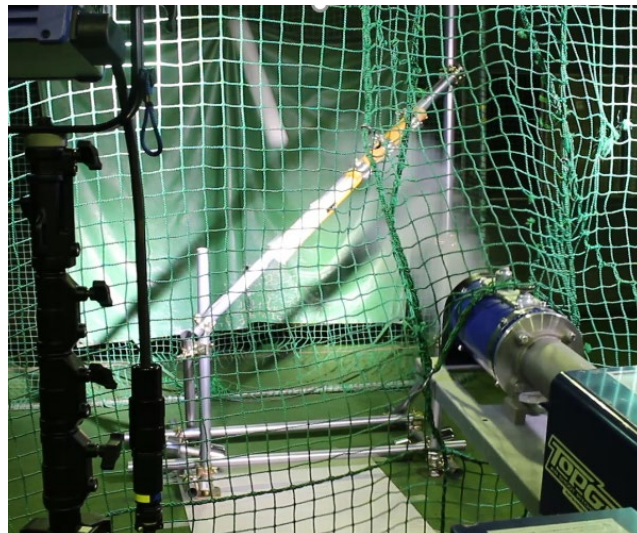


Fig. 3-1 Actual condition of the experiment.

ピッチングマシンは, 発射口から固定したバットの芯 (バットヘッドからバットグリップに向かって0.1–0.2 mの間) までの距離が2 mになるように設置し, 両者の高さが同じになるように調整した (Fig. 3-2)。本実験では, バットを固定しているため, バットは速度を持っていない。国際大会におけるトップレベルの選手の打撃を分析した研究 (森下ら, 2012) によると, インパクト時のバットスイング速度は約150 km/h (約42 m/s) に達することが報告されている。また, 投手が投じるボールの速度は160 km/h (約44 m/s) を超えること

も報告されている (Baseball Savant, online). そのため, トップレベルの試合でのバットとボールのインパクト時の相対速度を想定し, 本研究ではピッチングマシンの投球速度を 85–90 m/s になるように設定した. また, 投球の回転は, 投球方向に対してバックスピンになるように設定した. 実験に先立ち 20 球の投球の回転数を確認した. その平均値は  $22.1 \pm 5.6$  rps であった.

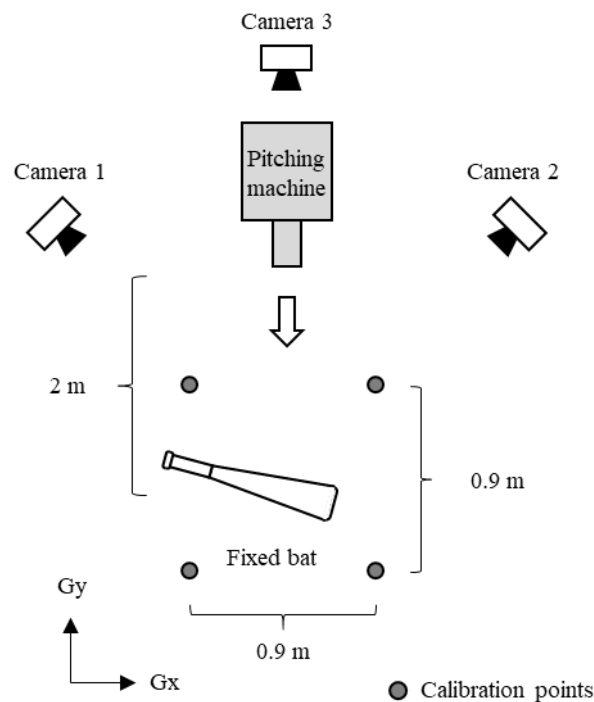


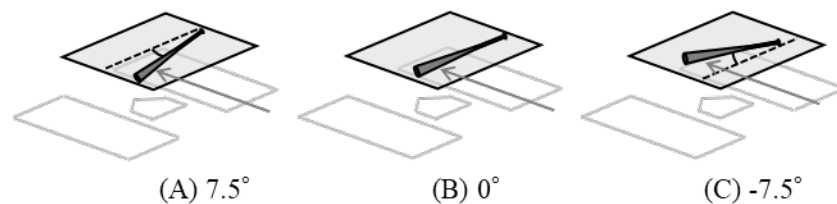
Fig. 3-2 Experimental setup (top view).

バットは, 建築現場で作業するための足場用資材などに使用される単管パイプで作成したフレームに固定した. ボールが衝突する部分を避け, バットグリップからバットヘッドに向かって約 0.05m, 0.2m, 0.35m の 3 か所を, クランプを用いてフレームに取り付けた. さらに, バットとフレームの間には発砲ゴム素材の緩衝材を隙間なく挟み込み, フレームにバット全体が固定されるように設置した. このようにバット全体をフレームに固定したため, ボールが衝突することに伴うバットのしなりはほとんどなかったものと考えられる.

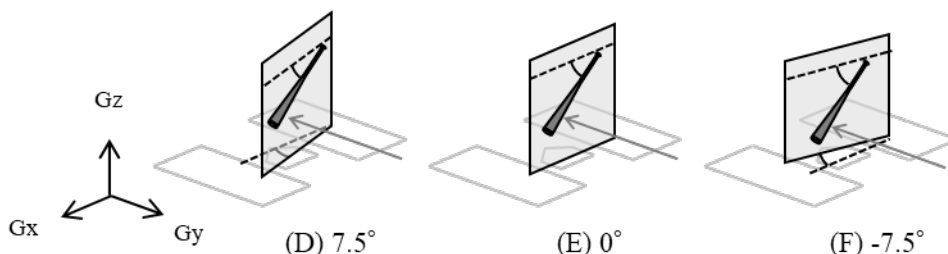
バットの向きは以下の6つに調節した (Fig. 3-3). (A) : バット長軸を水平にし、且つ投球に対して垂直な状態から水平面内で  $7.5^\circ$  (上方から見て反時計回りに) 回転させた, (B) : バット長軸を水平にし、且つ投球に対して垂直にした, (C) : バット長軸を水平にし、且つ投球に対して垂直な状態から水平面内で  $-7.5^\circ$  (上方から見て時計回りに) 回転させた, (D) : バットヘッドをバットグリップよりも  $40^\circ$  下に傾斜させ、且つバット長軸が投球に対して垂直な状態から水平面内で  $7.5^\circ$  (上方から見て反時計回りに) 回転させた, (E) : バットヘッドをバットグリップよりも  $40^\circ$  下に傾斜させ、且つバット長軸を投球に対して垂直にした, (F) : バットヘッドをバットグリップよりも  $40^\circ$  下に傾斜させ、且つバット長軸が投球に対して垂直な状態から水平面内で  $-7.5^\circ$  (上方から見て時計回りに) 回転させた.

(A)・(B)・(C) をバット水平条件 (Horizontal condition), (D)・(E)・(F) をバット傾斜条件 ( $40^\circ$  tilted condition) と定義した. なお, バット傾斜条件における傾斜角度は, 左右に鋭い打球が放たれた際のバットの動きを分析した研究 (森下と矢内, 2018) において, バットの傾斜角度の最大値は  $41.4^\circ$  であったと報告されているのを参考に  $40^\circ$  と決定した.

#### Horizontal condition



#### $40^\circ$ tilted condition



**Fig. 3-3** Bat angles and definitions of the groups.

## 第2項 データ収集

バットとの衝突前後のボールの動きを、3台の高速度ビデオカメラを用いて、撮影速度1000 fps、露光時間1/10000 sで撮影した。

投球および打球の速度、打球の発射角度ならびにバット長軸上のボールのインパクト位置を算出するため、電氣的に同期された2台の高速度ビデオカメラ（MEMRECAM MX、ナックイメーヂテクノロジー社製）を使用した（Fig. 3-2；Camera 1, Camera 2）。これらのカメラは、バットを設置した位置からピッチングマシンの方向を見て、右および左斜め前方の約6 m離れた地点にそれぞれ設置した。実験に先立ち、3次元空間を構築するため、撮影範囲の4か所に0.2 mごとに色の異なるキャリブレーションボールを順に立て、較正用の撮影を行った。静止座標系は、固定したバットからピッチングマシン方向をGy軸、鉛直上方向をGz軸、Gy軸とGz軸の外積方向をGx軸と定義し、撮影範囲は、 $G_x = 0.9$  m,  $G_y = 0.9$  m,  $G_z = 0.8$  mとした。なお、キャリブレーションの標準誤差は、6日間の平均で $G_x = 1.3 \pm 0.5$  mm,  $G_y = 1.3 \pm 0.5$  mm,  $G_z = 1.7 \pm 0.5$  mmであった。

打球の回転を算出するため、1台の高速度ビデオカメラ（実験1日目から3日目：MEMRECAM HX-7S、ナックイメーヂテクノロジー社製、実験4日目から6日目：Fastec TS3、日本ファステックイメージング社製）を使用した（Fig. 3-2；Camera 3）。このカメラは、ピッチングマシンの真後ろに、固定したバットから約4.5 m離れた位置に設置し、打球の回転が大きく映るように画角を調整した。

## 第3項 データ処理

3台のカメラで撮影した映像をデジタルソフト（Frame-DIAS V、ディケイエイチ社製）を用いて分析した。

Camera 1 および Camera 2 から得られた映像から、バットとボールの衝突前後5コマのボール中心、衝突前のバットヘッド、およびバットグリップ（バットヘッドからバットグリップに向かって0.3 mの位置に描かれたマーク）を手動でデジタル化し、DLT法により3

次元座標を取得した。得られたボール中心の3次元座標から、投球および打球の速度、ならびに発射角度（打球上下角、打球左右角）を求めた。打球上下角（Launch angle）は、打球の初速度ベクトルと水平面とのなす角度とし、打球の初速度ベクトルが上向きの場合を正の値で示した。打球左右角（Spray angle）は、打球の初速度ベクトルを水平面に投影したベクトルと Gy 軸とのなす角度とし、上方から見て Gy 軸よりも打球の初速度ベクトルが反時計回り方向を向いている場合を正の値として示した。また、バットヘッド、バットグリップ、およびボール中心の3次元座標から、バット長軸上のボールのインパクト位置を算出した。

Camera 3 から得られたバットとの衝突後のボールの映像から、ボールの上下左右の端、およびボール表面のマークを手動でデジタイズし、画面上での座標値を取得した。その後、Jinji and Sakurai (2006) の方法を用いて、打球の回転数および回転成分（バックスピン成分、スパイラルスピン成分、サイドスピン成分）を求めた。ここで得られた回転成分は静止座標系においての値であるため、以下のボール移動座標系に変換を行うことにより、打球の飛翔した方向に則した回転成分を算出した (Winter, 2009)。ボール移動座標系は、打球の初速度ベクトルを Ly 軸、Ly 軸と鉛直上方向のベクトルとの外積方向を Lx 軸、Lx 軸と Ly 軸との外積方向を Lz 軸と定義した。なお、打球の回転数 (Spin rate) は回転軸周り、バックスピン成分 (Backspin) は Lx 軸周り、スパイラルスピン成分 (Spiral spin) は Ly 軸周り、サイドスピン成分 (Sidespin) は Lz 軸周りの1秒間あたりの回転数とした。

収集した全てのデータの内、以下の2つの条件を満たした試技を分析の対象とした。1つ目の条件は、バット長軸上の芯（バットヘッドからバットグリップに向かって 0.1–0.2 m の間）に衝突していることとした。バットの芯の定義は、実際の打撃においてバットの芯の位置を定量化した城所と矢内 (2017b) の研究を参考にした。2つ目の条件は、打球上下角が 0–60° の範囲に収まっていることとした。近年のメジャーリーグで集められたビッグデータから、一定の打球速度を有し、打球上下角が 8–50° の範囲に飛翔した打球のほとんどが長打となっていると報告されている (mlb.com, online) ことから、上下に約 10° ずつ範囲を広げた 0–60° の範囲に飛翔した打球を分析対象とした。これらの条件を満たした全

82 試技, バット水平条件 41 試技 (A : 18 試技, B : 13 試技, C : 10 試技), バット傾斜条件 41 試技 (D : 14 試技, E : 18 試技, F : 9 試技) を分析した.

#### 第 4 項 統計処理

バット水平条件とバット傾斜条件の打球の回転を比較する前に, 実験条件に差がなかったことを確認するため, バット水平条件とバット傾斜条件の投球速度を対応のない t 検定を用いて比較した.

先行研究や第 2 章において, 打撃されたボールにはスパイラルスピン成分はほとんど加わらないことが報告されている (Sakurai et al., 2013) ことから, 本研究では両条件間の打球のバックスピン成分およびサイドスピン成分を比較することとした. また, 先行研究や第 2 章において, 打球上下角とバックスピン成分, 打球左右角とサイドスピン成分との間には相関関係があることが報告されている (Nathan et al., 2012, Kensrud and Smith, 2013). そのため, バット水平条件とバット傾斜条件の打球の回転を比較する場合, 打球の飛翔する方向の影響を考慮する必要がある. そこで, まずそれぞれの条件において, ピアソンの積率相関を用いて打球上下角とバックスピン成分, 打球左右角とサイドスピン成分の関係を調べた. そして, それらの関係が条件間で異なるかどうかを調べるため, 得られた回帰直線の傾きと切片の差の検定を行った. なお, 本研究では, 危険率 5%未満を統計的に有意であると判定した.



### 第3節 結果

打球速度の平均値と標準偏差はバット水平条件が  $88.4 \pm 1.5$  m/s, バット傾斜条件が  $88.0 \pm 1.2$  m/s であり, 両条件間に有意な差は認められなかった.

両条件を合わせた全試技の打球速度の平均値は  $16.0 \pm 3.1$  m/s であった. また, 全試技の打球の回転の絶対値における平均値は, 回転数が  $40.9 \pm 17.3$  rps, バックスピン成分が  $23.4 \pm 12.7$  rps, スパイラルスピン成分が  $4.1 \pm 3.5$  rps, サイドスピン成分が  $29.6 \pm 18.8$  rps であり, スパイラルスピン成分は, バックスピン成分やサイドスピン成分に比べ小さい値を示した.

それぞれの条件における打球の発射方向(打球上下角, 打球左右角)を Fig. 3-4 に示した. 打球左右角とサイドスピン成分の関係を Fig. 3-5 に示した. バット水平条件, バット傾斜条件ともに打球左右角とサイドスピン成分との間に有意な相関関係が認められた(バット水平条件:  $y = 1.0768x - 2.119$ ,  $r = 0.970$ , バット傾斜条件:  $y = 1.1203x + 4.7888$ ,  $r = 0.985$ ). また, 得られた両条件の回帰直線の傾きに有意な差は認められなかった. 一方で, 切片には有意な差が認められた. 打球上下角とバックスピン成分の関係を Fig. 3-6 に示した. バット水平条件, バット傾斜条件ともに打球上下角とバックスピン成分との間に有意な相関関係が認められた(バット水平条件:  $y = 0.693x - 2.4623$ ,  $r = 0.915$ , バット傾斜条件:  $y = 0.8599x - 1.768$ ,  $r = 0.800$ ). また, 得られた両条件の回帰直線の傾きおよび切片に有意な差は認められなかった.

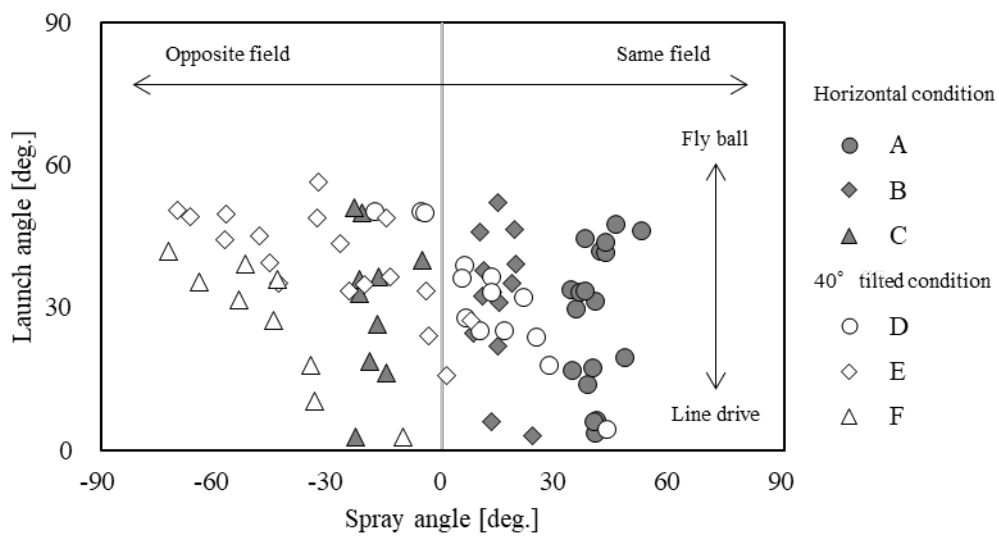


Fig. 3-4 Batted ball directions for each bat condition.

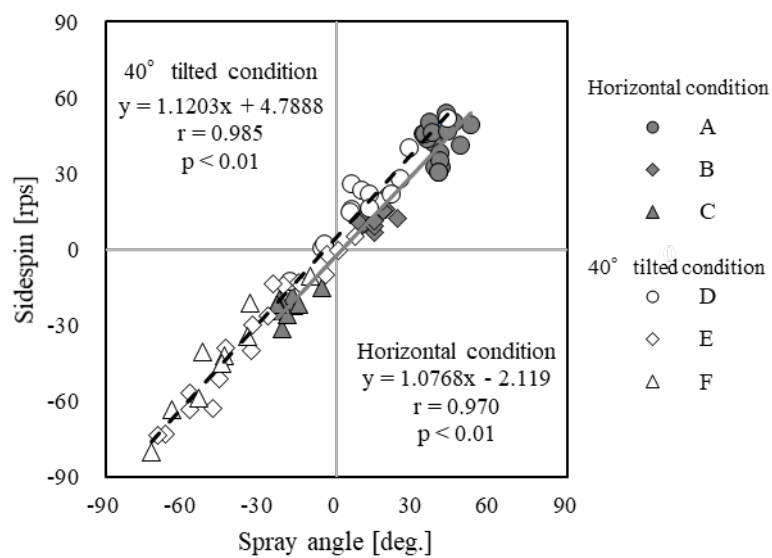


Fig. 3-5 Relationship between spray angle and sidespin.

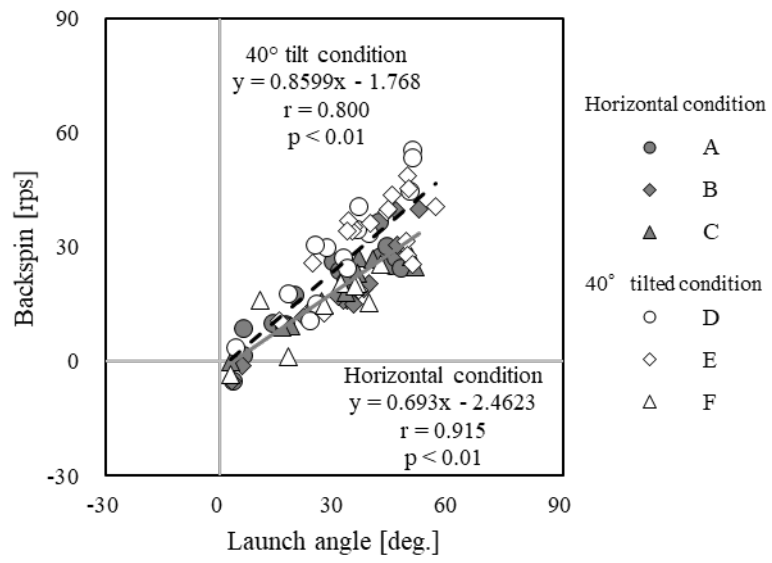


Fig. 3-6 Relationship between launch angle and backspin.

## 第4節 考察

### 第1項 本研究の実験設定について

はじめに、条件間の実験条件に差がなかったことを確認するため、投球速度を比較した。その結果、条件間に有意な差は認められなかった（バット水平条件： $88.4 \pm 1.5$  m/s、バット傾斜条件： $88.0 \pm 1.2$  m/s）ことから、実験は同一の条件下で行われたことが確認できた。

次に、固定したバットにボールを衝突させるという本研究の実験設定について考察する。本研究では、トップレベルの試合でのバットとボールのインパクト時の相対速度を想定し、ピッチングマシンの投球速度を85—90 m/sになるように設定した。しかしながら、バットが速度を持っていないことから、両条件を合わせた全試技の打球速度の平均値は $16.0 \pm 3.1$  m/sと試合においては長打とならない低速な打球となっていた。一見すると、本研究の実験設定が、実際の打撃時のバットとボールのインパクトとは大きく異なるのではないかと考えられる。そのため、本研究における実験設定が実際の打撃時のインパクトを模擬できていたかどうかについて以下に検討する。実際の打撃において、44m/sの投球（ボールの重量： $0.145$ kg）を42m/sのバットスイング速度（バットの重量： $0.9$ kg）で打撃したと仮定すると、インパクト前の運動量の総和は $31.42$ kgm/sとなる。この条件下で運動量が完全に保存されると仮定し、バットとボールのインパクト後の打球速度が実際の試合において長打となる40—50m/sになったとすると、インパクト後のバットスイング速度は26.9—28.5m/sまで減少することになる。このバットとボールのインパクトの現象をバットの視点に立って見ると、インパクト前はボールが86m/sで近づき、インパクト後はボールが11.5—23.1m/sで離れていくことになる。本研究では、投球速度の平均値が約88 m/s、打球速度の平均値が約16 m/sであった。バットの視点に立ってみると、実際の打撃とほとんど同じインパクトの現象が本研究の実験においても起こっていたと考えられる。このことから、本研究の実験設定は実際のバットとボールのインパクトを模擬できていたと考えられる。

## 第2項 打球の飛翔方向と回転について

まず、打球の飛翔方向について考察する。Fig. 3-4には、打球が飛翔した方向（打球上下角、打球左右角）を示した。バット水平条件において、水平面内でのバット長軸の角度が同一であれば、打球左右角はほとんど同じであり、打球上下角だけがばらついた。一方で、バット傾斜条件では、打球上下角が大きくなるにつれて、打球左右角はより小さくなった（流し打ち方向に飛翔した）。Fig. 3-4の分布をみると、両条件の試技が重なり合っており、城所と矢内（2015）が報告している通り、インパクト時のバットの向きが異なっても、同一の方向に打球が飛翔することが確認できた。

Fig. 3-4の分布を細かく見ると、バット水平条件の打球は全体的にやや引っ張り方向に偏って分布している。この理由について以下に考察する。バット水平条件の（B）において、打球左右角は $0^\circ$ になる（センター方向に飛翔する）と予想されたが、約 $10^\circ$ 引っ張り方向に飛翔した。これはバット長軸を投球に対して垂直に調節したことに起因すると考えられる。バットはグリップからヘッドにかけて徐々に太くなっていく形状をしており、本研究で使用したバットの長軸上の芯（バットヘッドからバットグリップに向かって $0.1\text{--}0.2\text{ m}$ の間）の投手側の面はバット長軸に対して約 $2^\circ$ 引っ張り方向を向いていた。さらに、投球速度の平均値が約 $88\text{ m/s}$ であったのに対し、打球速度の平均値は約 $16\text{ m/s}$ であったことから、反発係数が低く、衝突後の打球の（バット長軸に対して垂直方向の）速度が小さかったことが推察される。そのため、バットの投手側の面に対する入射角に比べ反射角が大きくなったと考えられる。投球速度と打球速度の平均値から反発係数が $0.182$ であったと仮定し、バットの投手側の面が約 $2^\circ$ 引っ張り方向を向いていたとすると、打球は約 $10^\circ$ 引っ張り方向に飛翔することになる。また、同様の理由から、その他の条件においても水平面内でのバット長軸の角度から予想される打球左右角よりも、実際の打球左右角が大きくなった（引っ張り方向に飛翔した）と推察される。

次に、打球の回転に着目する。打球の回転の絶対値における平均値は、バックスピン成分が $23.4 \pm 12.7\text{ rps}$ 、スパイラルスピン成分が $4.1 \pm 3.5\text{ rps}$ 、サイドスピン成分が $29.6 \pm 18.8$

rps であった。実際に放たれた打球の回転を調べた第 2 章の研究やテニスのサーブの回転を調べた Sakurai et al. (2013) が、打撃されたボールにはスパイラルスピン成分はほとんど加わらないと報告しているように、本研究においても、バックスピン成分やサイドスピン成分に比べスパイラルスピン成分は少なかった。そのため、以下の項で条件間での打球のバックスピン成分およびサイドスピン成分の違いについて検討する。

### 第 3 項 打球左右角とサイドスピン成分について

打球左右角とサイドスピン成分の関係について考察する (Fig. 3-5)。第 2 章において、打球左右角とサイドスピン成分との間に有意な相関関係があったことが明らかになった。本研究においても、両条件ともに打球左右角とサイドスピン成分との間に有意な相関関係が認められた (バット水平条件： $r = 0.970$ ，バット傾斜条件： $r = 0.985$ )。

得られた両条件の回帰直線の傾きの差の検定を行った結果、有意な差は認められなかった。これは、両条件ともに、打球左右角が大きくなるほど、サイドスピン成分が増え、その増え方も同程度であったことを意味している。ボールに回転が加わるメカニズムについて、テニスにおけるバウンド後の回転について説明している文献 (Cross and Lindsey, 2005) を参考に考察する。Cross and Lindsey (2005) によると、テニスボールがバウンドする場合、ボールの地面と接触する点は摩擦により減速するが、ボールの接触点の反対側 (ボールの上部) は接触点よりも減速しないため、回転が生じると説明している。これを野球のバットとボールのインパクトに置き換えると、ボールがバットに衝突したとき、ボールとバットの接触点は摩擦によって減速する。一方で、接触点の反対側の点の速度は接触点ほど落ちないため、ボールに回転が生み出される (Fig. 3-7a)。Fig. 3-7a のように上方から見てボールの中心よりも左側をインパクトした場合、打球は右側へ飛翔し、時計回り方向に回転する。より左側をインパクトすればするほど、打球はより右側へ飛翔し、接触点からボール中心までのモーメントアームが長くなるため、より回転は速くなる。逆に、ボールの右側をインパクトした場合、打球は左側へ飛翔し、反時計回り方向に回転する。以上のようなメカニズムでボ

ールに回転が加わるため、条件に関わらず、バットがボールをインパクトする位置によって、打球左右角とサイドスピン成分の両方が決定されたと考えられる。

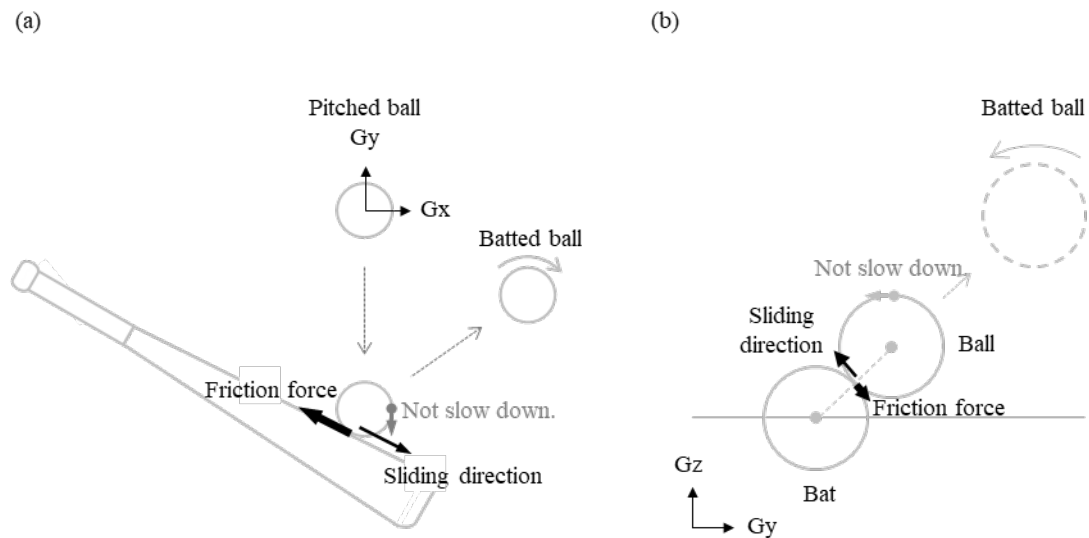


Fig. 3-7 Schematic diagram of the mechanism in which the bat imparts spin to the ball.

一方で、得られた両条件の回帰直線の切片には有意な差が認められた（バット水平条件：-2.119，バット傾斜条件：4.7888）。これは、打球左右角が正の方向（引っ張り方向）に打球が飛翔した場合、バット傾斜条件の方が（打球方向に対する）サイドスピン成分が多く、打球左右角が負の方向（流し打ち方向）に打球が飛翔した場合、バット水平条件の方が（打球方向に対する）サイドスピン成分が多かったことを意味している。この差はインパクト時のバットとボールの間に生じる摩擦力の違いによって生じたと考えられる。バット傾斜条件において、打球左右角が正の方向（引っ張り方向）へ打球が飛翔する場合、バット短軸上の中心付近でボールをインパクトしていることが推察される。一方で、打球左右角が負の方向（流し打ち方向）へ打球が飛翔する場合、バット短軸上の上部でボールをインパクトしていることが推察される。バット水平条件においては、同一の打球左右角の打球であっても、バット短軸上のボールのインパクト位置は中心付近から上部の間にばらついていると考えら

れる。Nathan et al. (2012) は、固定したシリンダーにボールを衝突させたときのボールの動きを調べた結果、バット短軸上の上部あるいは下部の端でボールをインパクトした場合、ボールがバットの表面上を滑ることを報告している。バット傾斜条件において、バット短軸上の上部でインパクトした場合、上方から見ると Fig. 3-7a で示した方向に、側方（バット長軸の延長線上）から見ると Fig. 3-7b で示した方向にボールが滑ることになる。その場合、接触点を減速させる摩擦力が小さくなり、打球の飛翔方向に対する回転数は少なくなると考えられる。このように摩擦力の違いによって打球の飛翔方向に対する回転数が異なるため、バット傾斜条件はバット水平条件に比べ、打球が引っ張り方向に飛翔した場合、（打球方向に対する）サイドスピン成分は多くなり、流し打ち方向へ飛翔した場合、（打球方向に対する）サイドスピン成分は少なくなったと考えられる。

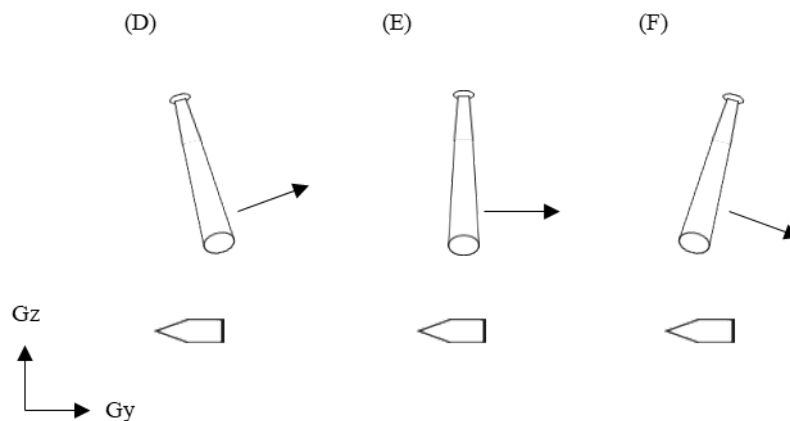
#### 第4項 打球上下角とバックスピン成分について

打球上下角とバックスピン成分の関係について考察する (Fig. 3-6)。Kensrud and Smith (2013) や Nathan et al. (2012) は、打球上下角が増大するのに伴い、バックスピン成分も増大することを報告している。本研究においても、両条件ともに打球上下角とバックスピン成分との間に有意な相関関係が認められた（バット水平条件： $r = 0.915$ ，バット傾斜条件： $r = 0.800$ ，Fig. 3-6）。

得られた両条件の回帰直線の傾きおよび切片の差の検定を行った結果、両者ともに有意な差は認められなかった。これは、条件に関わらず、同程度の打球上下角であれば、同程度のバックスピン成分であったことを意味している。しかしながら、Fig. 3-6を詳細に見ると、バット傾斜条件の (D) および (E) は、バット水平条件の回帰直線の上側に分布しているのに対し、(F) は下側に分布していた。このようにばらついた原因は、上述したサイドスピン成分の場合と同様に、バット短軸上のインパクト位置の違いによる摩擦力の違いにあると考えられる。バット傾斜条件において、バット短軸上の中心でボールをインパクトした場合、(D) では打球は上方に、(E) では打球は水平に、(F) では打球は下方に飛翔する (Fig.



3-8). つまり、同一の打球上下角に打球が飛翔した場合、(F)、(E)、(D)の順にバット短軸上の上部でボールをインパクトしていたことが推察される。そのため、(D)や(E)に比べ(F)では、Fig. 3-7bで示した方向にボールがバットの表面上を滑り、バットとボールの間に生じる摩擦力が小さくなったため、(打球上下角に対する)バックスピン成分が少なくなったと考えられる。以上のことから、条件ごとに(打球上下角に対する)バックスピン成分に多少のばらつきが見られたと考えられる。



**Fig. 3-8** Diagram of the bat angle in 40° tilted condition from side view and the batted ball direction after the ball impacts with the center of bat's short axis.

## 第5項 現場への示唆

本研究の結果から、実際の打撃場面を想定して、打者がどの程度(打球方向に対する)サイドスピン成分を減らせるかについて検討する。本研究ではバット水平条件とバット傾斜条件で、40°のバット長軸の傾斜角度の差をつけたにもかかわらず、打球左右角とサイドスピン成分における回帰直線の切片(打球方向に対するサイドスピン成分)の差は7 rps程であった。実際の打撃時には投球の高さやコースによって傾斜できるバット角度の範囲はある程度制限される。同一の高さ、コースに設定したティー台に置かれたボールをセンター方

向へ打撃させたときのバットスイングを分析した研究(光川ら, 2018)によると, インパクト時のバットの上下方向の傾斜における分析対象者間のばらつき(標準偏差)は $\pm 5.8^\circ$ であったと報告されている。そのため, 同一の高さ, コースに投げられた投球を同一の方向に打撃しようとした場合, 調整可能なバットの上下方向の傾斜角度の幅は $12^\circ$ 程度であると考えられる。このことから, バットの上下方向の傾斜を変えることにより, 変化させられる回転数は7 rpsよりもさらに少なくなると考えられる。これまで, 実践現場において, バットの傾斜角度が打球の回転に影響を及ぼすと考えられてきたが(古田, 2010; 池田, 2019), その影響は極めて小さいことが示唆された。

次に, 打者が意図的にわずかにでもサイドスピン成分を減らすことにより, 打球の飛距離を増大させられるかについて考察する。意図的にサイドスピン成分を減らすためには, バットとボールの間に働く摩擦力が小さくなるようにバット短軸上の端でボールをインパクトする必要がある。城所と矢内(2017b)は, バットの短軸上の芯の位置は中心から上部へ0.39—2.46cmの範囲にあると報告している。このことから, (打球方向に対する)サイドスピン成分が少なくなるようなバット短軸上の上部でインパクトされた打球の速度は小さくなると考えられる。さらに, 打者が意図的にバットの向きを変えてサイドスピン成分を変化させようとした場合, バット短軸上のわずかなインパクト位置を調整しなければならないだけでなく, スイングを開始するタイミングも調整する必要がある。その調整に捉われてしまうあまりバットスイング速度を低下させてしまうリスクも考えられる。

以上のことから, 打者が意図的に(打球方向に対する)サイドスピン成分を減らし, 飛距離を増大させようとすることは現実的ではないと考えられる。左右方向に放たれた打球には必ずサイドスピン成分が加わり, 横向きに飛翔軌道が変化してしまうことは避けられないため, 左右広角に飛距離の大きな打球を放つためには, 打球のサイドスピン成分を少なくすることよりも, 大きなバットスイング速度でボールをインパクトすることにより, 打球速度を大きくすることが重要であると考えられる。

## 第5節 本章のまとめ

本研究では、野球におけるバットとボールのインパクト時のバット長軸の上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、長軸を水平にして固定したバット（バット水平条件）と長軸を  $40^\circ$  傾斜させて固定したバット（バット傾斜条件）にピッチングマシンから投射される  $85\text{--}90\text{ m/s}$  のボールを衝突させ、衝突後の打球の回転を比較した。

その結果、インパクト時のバットの上下方向の傾斜は打球のサイドスピン成分に影響を及ぼすことが明らかとなったが、バットの傾斜角度の差が  $40^\circ$  であるのに対して、打球のサイドスピン成分の差は  $7\text{ rps}$  程度であった。実際の打撃場面を想定した場合、インパクト時のバットの向きは投球の高さやコースによってある程度制限されるため、打者が意図的にバットの上下方向の傾斜角度を変えることにより制御できるサイドスピン成分はほんのわずかであり、飛距離に影響を及ぼすほどサイドスピン成分を変えることはできないことが示唆された。そのため、広角に長打を放つためには、インパクト時のバットの向きを調整して打球の回転を制御しようとするのではなく、打球の速度を高めるために、バットスイング速度を増大させることに重点を置くべきであることが示唆された。

## 第4章 左右広角に飛距離の大きな打球を放つための打球特性の定量化（研究課題3）

### 第1節 本章の緒言

第2章において、左右広角への飛距離を増大させるためには、打者はさらに打球速度を増大させるか、打球のサイドスピン成分を減らして打球を直線的に飛ばす必要があることが示唆された。そして、第3章では、打球のサイドスピン成分を減らすことが可能かどうかについて検証した。その結果、同一の方向に飛翔した打球にはほとんど同一の回転が加わることから、打球の飛翔する方向に対する回転を打者が制御することは難しいことが明らかになり、左右広角への飛距離を増大させるためには、打球速度を高めることが唯一の方法であることが示唆された。

そこで、どの程度打球速度を高めれば、どの程度の飛距離が期待できるのかという疑問が生じる。Adair (2002) は、水平面から上向きに  $35^\circ$  の角度で発射し、かつ、バックスピンを有する打球において、打球速度を基に飛距離を推定している。しかしながら、この推定に用いた計算では、ボールにサイドスピン成分が加わることにより、横向きに飛翔軌道が変化することまでは想定されていない。第2章において、打球方向別にサイドスピン成分が異なり、それが飛距離に影響を及ぼすことが明らかになった。そのため、打球速度から飛距離を推定する場合、打球の飛翔方向毎に分けて求める必要があると考えられる。各方向へ飛距離の大きな打球を放つために必要な打球速度を含む打球特性を定量化できれば、打者は明確な目標を持って練習やトレーニングに励むことが可能になると考えられる。

そこで本研究の目的は、引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向の打球方向別に、打球速度と飛距離との関係を明らかにし、各方向へ飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を定量化することとした。

## 第2節 方法

本研究では、第2章の研究課題1で収集したデータを使用したため、第1項の分析対象者、第2項の実験試技、第3項のデータ収集は、第2章と同様である。そのため、以下に第4項以降を記載する。

### 第4項 データ処理

撮影した全116試技のうち、風速が $\pm 1.5\text{m/s}$ 以上を記録した試技、打球がカメラの画角内に収まらなかった、あるいはデジタルポイントが明瞭に確認できなかった試技、打球が外野フェンスを越えて落下地点を特定できなかった試技を除いた79試技（引っ張り方向：24試技、センター方向：29試技、流し打ち方向：26試技）を分析した。

撮影した映像をPCに取り込み、デジタルソフト（Frame DIAS V、ディケイエイチ社製）を用いて分析した。Camera 1およびCamera 2より得られた映像から、バットとボールのインパクト前後5コマのボール中心をデジタルポイントし、3次元DLT法により3次元座標を取得した。得られたボールの3次元座標から、投球および打球の速度、ならびに打球上下角を求めた。打球上下角（Launch angle）は、打球の初速度ベクトルと水平面とのなす角度とし、打球の初速度ベクトルが上向きの場合を正の値で示した。

Camera 3より得られたバットとのインパクト後のボールの映像から、インパクト直後とその5コマ後のボールの上下左右の端、およびボール表面のマークを手動でデジタルポイントし、画面上での座標値を取得した。その後、Jinji and Sakurai (2006)の方法を用いて、打球の回転数及び回転軸を求め、上向きの揚力に影響を及ぼすバックスピン成分を算出した。このバックスピン成分は静止座標系においての値であるため、以下のボール移動座標系に変換を行うことにより、打球の飛翔した方向に則したバックスピン成分を算出した（Winter, 2009; Fig. 2-2a）。ボール移動座標系は、ボール中心を原点とする右手座標系であり、水平面内での打球の初速度ベクトルをLy軸、鉛直上向きをLz軸、Ly軸とLz軸との外積方向をLx軸と定義した。なお、打球のバックスピン成分（Backspin）はLx軸周りの1秒間あ

たりの回転数とした (Fig. 2-2b).

続いて、打球方向別に、打球速度と飛距離の関係を調べた。打球速度を説明変数、飛距離を目的変数とした一般的な回帰直線の場合、ある打球速度から推定される飛距離が実際の飛距離よりも、過大あるいは過小評価される場合が生じる。そこで、本研究では、①飛距離の推定値が実測値を下回らないこと、②推定値と実測値の差分の二乗和が最小化されることの2つの条件を満たす回帰直線を求めた。この直線上の値は、ある打球速度で生み出すことのできる飛距離の上限値、すなわち期待できる最大の飛距離を示している。得られた回帰直線から、各方向へ60m、70m、80m、90m、100m、110m、120mの距離まで打球を飛ばすために必要な最小限度の打球速度を定量化した。

次に、打球上下角およびバックスピン成分と飛距離の関係を調べた。それぞれ、打球上下角およびバックスピン成分を説明変数、飛距離の実測値から、回帰直線から推定される飛距離の上限値を減じた値（飛距離差：Flight distance gap）を目的変数として2次の回帰曲線を求めた。これらの関係について、2次曲線を求めた理由は、先行研究において、35°の打球上下角の場合に飛距離が最大となること（Adair, 2002）、バックスピン成分は打球速度とトレードオフの関係にあること（城所ら, 2011）が報告されており、打球上下角とバックスピン成分には最適値が存在すると考えられたためである。これを基に、飛距離の大きな打球を放つために必要な打球上下角およびバックスピン成分を求めた。なお、これらを求める際には、全ての打球方向の試技を含めて検討した。

### 第3節 結果

収集した打球の飛距離の範囲は、引っ張り方向：62.2—109.2m，センター方向：61.2—119.0m，流し打ち方向：64.4—96.3mであった。Fig. 4-1には、打球速度と飛距離の関係を示した。ある打球速度（x）で生み出すことのできる飛距離の上限値（y）は、以下の式で示された（引っ張り方向： $y = 3.51x - 30.89$ ，センター方向： $y = 3.38x - 28.32$ ，流し打ち方向： $y = 3.19x - 26.78$ ）。Table 4-1には各打球方向に60m，70m，80m，90m，100m，110m，120mの飛距離を放つために必要な打球速度を示した。Fig. 4-2には、打球上下角と飛距離差との関係（ $R^2 = 0.70$ ， $y = -0.0594x^2 + 4.1963x - 76.656$ ）を示した。Fig. 4-3には、バックスピン成分と飛距離差（ $R^2 = 0.43$ ， $y = -0.0172x^2 + 1.4353x - 35.985$ ）の関係を示した。

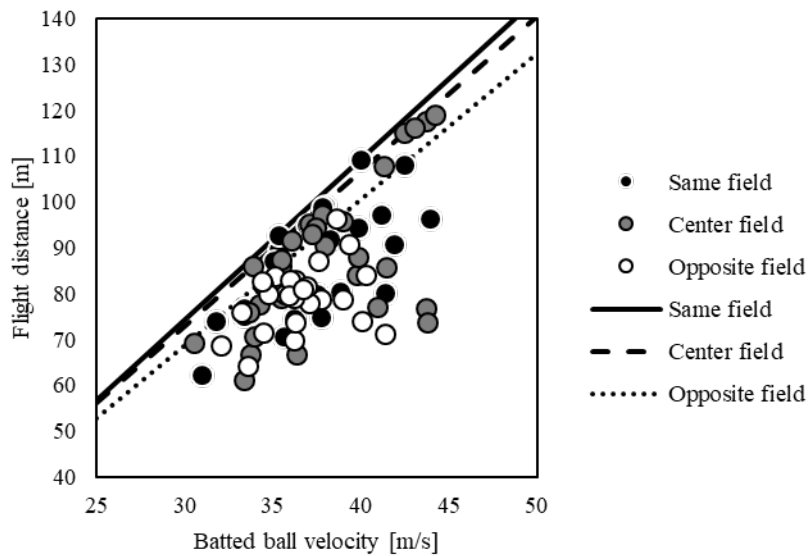
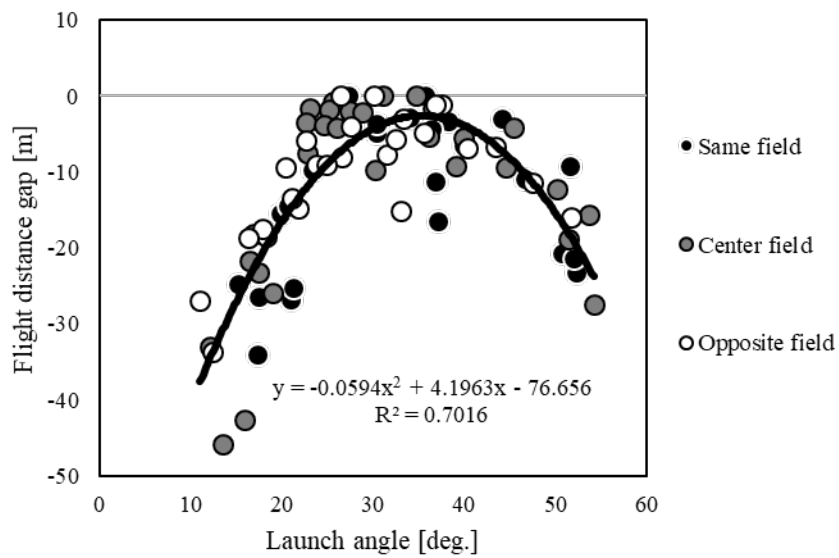


Fig. 4-1 Relationship between the batted ball velocity and flight distance.

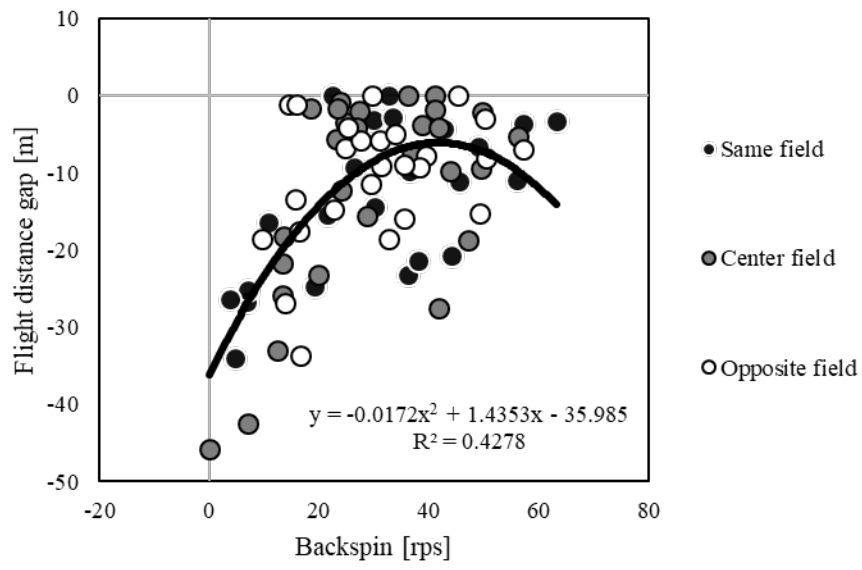
**Table 4-1** Minimum required batted ball velocity for hitting a long fly ball.

	Same field	Center field	Opposite field
60m	25.9 m/s	26.1 m/s	27.2 m/s
70m	28.8 m/s	29.1 m/s	30.4 m/s
80m	31.6 m/s	32.1 m/s	33.5 m/s
90m	34.5 m/s	35.0 m/s	36.6 m/s
100m	37.3 m/s	38.0 m/s	39.8 m/s
110m	40.2 m/s	40.9 m/s	42.9 m/s
120m	43.0 m/s	43.9 m/s	46.0 m/s



**Fig. 4-2** Relationship between launch angle and flight distance gap.





**Fig. 4-3** Relationship between backspin and flight distance gap.

## 第4節 考察

### 第1項 各方向に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性

Fig. 4-1 に打球速度と飛距離の関係を示した。本研究では、ある打球速度で生み出すことのできる推定の飛距離の上限値を打球方向別に求めた。その結果、打球速度を説明変数(x)、飛距離を目的変数(y)とする1次関数で、ある打球速度から期待される最大の飛距離が示された(引っ張り方向： $y = 3.51x - 30.89$ 、センター方向： $y = 3.38x - 28.32$ 、流し打ち方向： $y = 3.19x - 26.78$ )。これらの式の目的変数(y)に飛距離を代入することにより、その飛距離まで打球を飛ばすために必要な最小限の打球速度を求めることができる。Table 4-1 には、各方向に60—120m放つために必要な最小限の打球速度を示した。多くの野球場において、引っ張り方向あるいは流し打ち方向へ本塁打を放つためには、100m以上の飛距離の打球を放つ必要がある。100mの飛距離の打球を放つためには、引っ張り方向へは37.3m/s、流し打ち方向へは39.8m/sが最低限必要であることが明らかになった。流し打ち方向への打球は、飛翔中に横向きに大きく軌道が変化するため、他方向と同一の距離まで打球を飛ばすためには、大きな速度が必要であることが示された。また、打球方向に限らず、飛距離を増大させるためには、打球速度の増大が不可欠であり、10m飛距離を増大させるためには、約3m/sの打球速度の増大が必要であることも示唆された。

Table 4-1 で示した打球速度は、各距離まで打球を飛ばすために必要な最小限の打球速度である。ここで示した打球速度で、最大の飛距離を獲得するためには、適切な打球上下角とバックスピン成分で打球を放つ必要もある。打球上下角と飛距離差との間には、2次の曲線回帰の関係が認められ( $R^2 = 0.70$ , Fig. 4-2)、打球上下角が $35.3^\circ$ の場合に、打球速度から期待される最大の飛距離に最も近づくことが明らかになった。一方で、Fig. 4-2の分布を見ると、打球上下角が約 $20\text{—}40^\circ$ の打球は、打球速度から期待される最大の飛距離に近かった。Adair (2002) は、打球上下角が $35^\circ$ の場合に飛距離は最大となるが、 $30^\circ$ や $40^\circ$ で打ち出された場合でも、同程度の飛距離が期待できると報告しており、本研究の結果はAdair (2002)の結果を支持するものであった。このように、打球上下角は一定の範囲内で

あれば、同程度の飛距離が期待できることが示唆された。

Fig. 4-3 には、バックスピン成分と飛距離差の関係を示した。0—20rps の範囲では、バックスピン成分が増加するほど、打球速度から期待される最大の飛距離に近づいていった。Nathan (2008) が報告している通り、バックスピン成分が増えるほど、打球速度から期待される最大の飛距離に近くなることが明らかになった。しかしながら、およそ 20rps 以上ではバックスピン成分が増加しても、飛距離差はほとんど変わらなかった。城所ら (2011) は、打球速度と回転数はトレードオフの関係にあることを報告している。本研究においても、打球速度とバックスピン成分の間には負の相関関係が認められた ( $r = -0.50, p < 0.01$ )。このことから、バックスピン成分の多い試技は打球速度が小さく、期待される飛距離も小さかったことが考えられる。

以上のことから、各方向の各距離まで打球を飛ばすためには、Table 4-1 で示した速度をボールに与えることに加え、20—40° 程度の打球上下角をつけ、ボールに少なくとも 20rps 程度のバックスピン成分を与える必要があることが明らかになった。

## 第 2 項 現場への示唆

打球の飛距離を向上させるためのトレーニングを行う場合、具体的に飛距離をどれくらい増大させたいのか明確な目標を立て、トレーニング計画を立案し (Plan)、その目標に向かってトレーニングを実施し (Do)、その効果を検証し (Check)、改善していく (Action) という PDCA サイクルを繰り返すことが重要である。近年では、飛距離に影響を及ぼすバットスイング速度や打球速度などを簡便に計測できる機器が開発され、各選手は普段から自身の能力を把握できる環境が整ってきている (清水ら, 2015)。さらに、先行研究において、バットスイング速度や打球速度を高めるための動作要因の検討やトレーニング効果の検証も行われている (Szymanski, et al., 2009; 勝亦と森下, 2017)。このように、現在では、科学的知見に基づいたトレーニング方法の選択やトレーニング効果の検証 (Do・Check・Action) を実践現場に取り入れることが可能になってきた。一方で、ある距離まで打球を飛

ばすために必要な打球の特性はこれまで明らかにされていなかった。本研究において、飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を定量化したことは、具体的な目標やトレーニング計画を立案（Plan）する上で有用な指標となると考えられる。

### 第3項 本研究の限界と今後の課題

本研究の限界として、打球が外野フェンスを越えて落下地点を特定できなかった2試技を除外したことが挙げられる。そのため、打球速度から推定される飛距離の最大値が低く見積もられている可能性が考えられるが、これらの試技はいずれも同一方向内の試技の中で、最も打球速度が大きかった。このことから、これらの試技はFig.4-1の各直線の延長線上付近に分布すると考えられるため、結果に大きく影響することはなかったと考えられる。

また、本研究では屋外の野球場にて実験を行ったため、第2章と同様に、風による飛距離への影響が最大でおよそ3m含まれている可能性が考えられる。

さらに、本研究の分析試技数は79試技と少なかったため、統計的な分析ができなかった。また、分析試技数が少なかったことから、打球上下角およびバックスピン成分と飛距離差の関係については打球方向別に調査していない。近年は、メジャーリーグやプロ野球などで、試合全体を通してボールや選手の動きを数値化するトラッキングシステムが導入されている。今後は、そのような膨大なデータを用いて、さらに詳細に分析を行う必要があるだろう。

## 第5節 本章のまとめ

本研究では、引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向の各方向へ飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 100mの距離まで打球を飛ばすためには、引っ張り方向には37.3m/s、センター方向には38.0m/s、流し打ち方向には39.8m/sの打球速度が最低限必要である。
- 2) 最低限の打球速度で最大の飛距離を獲得するためには、約20—40°の打球上下角で打球を放ち、かつ、少なくとも20rpsのバックスピン成分をボールに加える必要がある。

これらの知見は、選手が飛距離の大きな打球を放つための練習やトレーニングをする上で有用な指標になると考えられる。

## 第5章 総合考察

本研究では、野球において左右広角に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を明らかにし、その打球を放つためのバットスイングについて検討することを目的とし、3つの研究を行った。本章では、これらの研究結果を総合的に考察し、左右広角への打球の飛距離の増大に役立つ有用な知見を示す。

### 第1節 左右広角へ飛距離の大きな打球を放つための打球特性

第2章（研究課題1）では、実際に左右広角へ放たれた打球の特性を理解するため、打者にピッチングマシンから投射されるボールを打撃させ、打球方向別の打球特性を比較し、打球特性が飛距離に及ぼす影響について検討した。その結果、打球方向別に打球のサイドスピン成分が異なり、引っ張り方向とセンター方向の間を境に、左右に離れた方向（流し打ち方向や引っ張り方向のファウルライン際）に打球が飛翔するほど、サイドスピン成分が多くなることが明らかになった（Fig. 2-4）。また、サイドスピン成分が多いほど、横向きに作用するマグヌス力も大きくなるため、横向きに飛翔軌道が変化し（Fig. 2-3）、飛距離が短くなることが示唆された。これまで、経験的に流し打ち方向やファウルポール際の打球は、ファウル地域方向へ飛翔軌道が変化すると考えられてきたが、実際にサイドスピがかかっており、飛翔軌道が変化していたことが確認できた。

一方で、実践現場においては、左右へ放たれた打球であっても、バットを水平に近い状態でボールをインパクトすることにより、サイドスピン成分が少なくなり、直線的に打球を飛ばすことが可能であると考えられている（古田，2010；池田，2019）。打球の飛翔した方向に対するサイドスピン成分を減らし、直線的に打球を飛翔させることができれば、左右広角に飛距離の大きな打球を放つことが可能になると考えられた。

そこで、第3章（研究課題2）では、長軸を水平にして固定したバットと長軸を傾斜させて固定したバットにピッチングマシンから投射されるボールを衝突させ、衝突後の打球の

回転を比較し、インパクト時のバットの上下方向の傾斜を変えることによって打球のサイドスピン成分を減らすことが可能か否かについて検証した。その結果、実際に試合において、打者が意図的に変化させられるバットの傾斜角の範囲内では、打球のサイドスピン成分を減らすことは困難であることが示唆された。このことから、左右に放たれた打球には必ずサイドスピン成分が加わり、横向きに飛翔軌道が変化することは避けられないため、左右広角に飛距離の大きな打球を放つためには、打球のサイドスピン成分を少なくすることよりも、打球速度を大きくすることが重要であることが示唆された。

第2章（研究課題1）および第3章（研究課題2）の結果から、打球のサイドスピン成分は打球方向ごとに異なるため、同一の速度・角度・バックスピン成分の打球が放たれた場合であっても、方向ごとに飛距離が異なることが推察された。そこで、第4章（研究課題3）では、飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を打球方向別に定量化した。その結果、同じ飛距離の打球を放つとしても、打球方向ごとに必要な打球速度が異なることが明らかになり、特に流し打ち方向への打球には、引っ張り方向やセンター方向への打球よりも大きな速度が必要であることが示唆された（Table 4-1）。また、打球方向に限らず、飛距離を増大させるためには、打球速度の増大が不可欠であり、10m 飛距離を増大させるためには、約 3m/s の打球速度の増大が必要であることも示唆された。加えて、最低限の打球速度で、最大の飛距離を獲得するためには、打球を水平面から上向きに約 20—40° の角度で打ち上げること、ボールに少なくとも 20rps のバックスピン成分を加える必要があることも示唆された（Fig. 4-2 ; Fig. 4-3）。

以上の結果をまとめると、左右方向へ放たれた打球は、必ず横向きに飛翔軌道が変化してしまうため、飛距離の大きな打球を放つためには、飛翔軌道が変化したとしても遠くへ飛ぶような速度の大きな打球を放つ必要がある（Table 4-1）。加えて、少なくとも 20rps のバックスピン成分をボールに加え、水平面から約 20—40° 上向きに発射させることで、打球速度から期待できる飛距離を最大化できることが示唆された。

## 第2節 打球にサイドスピン成分が加わる要因

本節では、飛距離に影響を及ぼすサイドスピン成分が打球に加わる要因について検討する。第2章、第3章において、打球の飛翔した方向別にサイドスピン成分が異なることが明らかになった。その理由は、以下のように説明できる。Fig. 3-7aのように上方から見てボールの中心よりも左側をインパクトした場合、打球は右側へ飛翔し、時計回り方向に回転する。より左側をインパクトすればするほど、打球はより右側へ飛翔し、接触点からボール中心までのモーメントアームが長くなるため、より回転は速くなる。逆に、ボールの右側をインパクトした場合、打球は左側へ飛翔し、反時計回り方向に回転する。以上のようにボールのインパクト位置によって、打球の飛翔する方向と回転が決まるため、打球の飛翔した方向別にサイドスピン成分が異なると考えられる。

しかしながら、固定したバットとの衝突後のボールを調べた第3章では、センターラインを境に打球のサイドスピン成分の正負が反対になった (Fig. 3-5) のに対し、実際に打者に打撃されたボールを調べた第2章の研究では、引っ張り方向とセンター方向の中間を境に打球のサイドスピン成分の正負が反対になった (Fig. 2-4)。このように、2つの研究で、打球の回転方向が切り替わる位置が異なり、実際に打者が打撃した場合、センター方向に飛翔した打球であってもサイドスピン成分が含まれていたことが明らかになった。通常打者は、ボールをインパクトする際にバットヘッドをバットグリップよりも下方に傾斜させている。また、バットとのインパクト時にはボールが潰れることがわかっている。右打者が、センター方向、且つ上向きに打球を放つ場合、ボールの中心のやや下をインパクトすることになるが、実際のバットとボールは点ではなく面で接触する。この場合、その面は、ボールの中心の下側、且つ打者側の一定の範囲である。さらに、バットはボールとの接触中にセンター方向へ動いているため、上方から見て時計回りにボールを回転させる力が作用すると考えられる。以上のように、実際に打撃したボールにおいては、センター方向へ飛翔した打球であってもサイドスピン成分が加わっており、サイドスピン成分の正負が引っ張り方向とセンター方向の中間で変わったと考えられる。



### 第3節 左右広角へ飛距離の大きな打球を放つためのバットスイング

第1節で示した打球特性を生み出すバットスイングについて考察する。まず、打球速度を高めるためには、バットスイング速度を高めることが最も重要である。城所と矢内(2017b)は、あるバットスイング速度から生み出すことのできる最大の打球速度について定量化している。それは、 $y = 0.872x + 12.984$  ( $x$  はバットスイング速度,  $y$  は打球速度) で表すことができる。第4章(研究課題3)において、100mの飛距離の打球を放つためには、引っ張り方向には37.3m/s、センター方向には38.0m/s、流し打ち方向には39.8m/sの打球速度が最低限必要であることを示した(Table 4-1)。これを城所と矢内(2017b)が示した式の( $y$ )に当てはめると、引っ張り方向には27.9m/s、センター方向には28.7m/s、流し打ち方向には30.8m/sのバットスイング速度が最低限必要であることがわかる。しかしながら、この式から導かれるバットスイング速度は、ある打球速度を生み出すために必要な最小限度の値であり、ボールにバックスピン成分を加えることや上向きに発射させることは考慮していない。ボールに約20—40°の打球上下角をつけ、20rps以上のバックスピン成分を加える必要があることを考慮すると、上述したバットスイング速度よりも大きなバットスイング速度が必要であると考えられる。このように、数値の解釈には注意が必要であるものの、第4章(研究課題3)の結果および城所と矢内(2017b)の式から求められる、ある飛距離まで打球を飛ばすために必要な最小限のバットスイング速度は、選手がバットスイング速度を向上させるうえで有用な指標となるだろう。

加えて、最小限のバットスイング速度で大きな速度をボールに加えるためには、インパクト時のバットのスイング軌道やバットとボールのインパクト位置も重要である。投球されたボールは、打者がインパクトする時点では、必ず下向きの速度ベクトルを持っている。そのため、効率的にボールに速度を加えるためには、アッパースイングでインパクトを迎える必要がある(Sawicki et al., 2003; 城所ら, 2011)。また、城所と矢内(2017b)は、バットの芯は、バットヘッドから長軸方向に9.64—19.29cmの間、且つ短軸方向に中心から上部へ0.39—2.46cmの範囲にあることを報告しており、この範囲内でボールをインパクトする

ことも重要であるだろう。

次に、先行研究および本研究において、飛距離の大きな打球を放つことが難しいと考えられた流し打ち方向への飛距離を増大させるためのバットスイングについてまとめる。第2章（研究課題1）および第4章（研究課題3）において、流し打ち方向への打球は、サイドスピンの成分が多く、飛翔軌道が大きく変化し、飛距離が短くなるため、飛距離の大きな打球を放つためには他方向に比べ大きな速度をボールに加えなければならないことが明らかになった。しかしながら、先行研究において、流し打ち方向へ打撃する場合、インパクトまでのバットを加速させる距離が短いことから、バットスイング速度が小さくなる傾向にあることが報告されている（城所と矢内，2017a；光川ら，2018）。また、流し打ち方向へ打撃する場合、比較的捕手側でボールをインパクトするため、下に凸の2次曲線のような軌道を描くバットスイングの中で、最下点に達する前のダウンスイングの局面でボールをインパクトする傾向にあることが報告されている（森下と矢内，2018）。このように、流し打ち方向へ打撃する場合、打球速度が大きくなりにくいスイングとなっていることが示されている。そのため、流し打ち方向へ飛距離の大きな打球を放つためには、あらかじめテイクバックを大きく取っておき、インパクトまでにバットを十分に加速させること、さらには、バットヘッドをスイング開始後の早い段階で下降させることで、アッパースイングの局面でインパクトを迎えられるようにすることが重要であると考えられる。加えて、下方に傾斜したバットの短軸上の上部でインパクトすることにより流し打ち方向へ打球を飛翔させると、打球速度の低下を招く可能性がある（城所と矢内，2017a）。そのため、タイミングを合わせ、バットの投手側の面を流し打ち方向へ向けた状態で、バットの芯（バット短軸上の中心部）でボールを捉えることにより、流し打ちへ打球を飛翔させることも必要になるだろう。

#### 第4節 本研究の限界と今後の課題

最後に、本研究の限界と今後の課題について考察する。第3章（研究課題2）において、長軸を水平にして固定したバットと長軸を傾斜させて固定したバットにピッチングマシン

から投射されるボールを衝突させ、衝突後の打球の回転を比較した結果、インパクト時のバットの向きを調整することにより、打球が飛翔した方向に対する回転を制御することが困難であることが示唆された。そのため、実践において、打者が打球の回転を制御することは困難であると判断した。しかしながら、第3章における実験では、インパクト時のバットの向きのみに焦点を当てているため、必ずしも打者が打球の回転を制御できないとは言い切れない。第2節で示した通り、インパクト中のバットの動きも打球の回転に影響を及ぼしている可能性も考えられる。そのため、今後、インパクト中のバットの動きが打球の回転に及ぼす影響についても検証する必要があると考えられる。

前節において、城所ら（2017b）の式を用いて、飛距離の大きな打球を放つために必要な最小限度のバットスイング速度を示した。しかしながら、このバットスイング速度は、ボールにバックスピン成分を加えることや上向きに発射させることは考慮していないため、数値の解釈には注意が必要であることを先述した。近年は、メジャーリーグやプロ野球において、選手やボールの動きなどのあらゆる情報を数値化するトラッキングシステムが導入されている。そのため、今後は、トラッキングシステムから得られた膨大なデータを用いて、バットスイング速度と飛距離の関係を調査することにより、飛距離の大きな打球を放つために必要なバットスイング速度について、より正確に明らかにすることができると考えられる。

## 第6章 総括

本研究では、野球において左右広角に飛距離の大きな打球を放つために必要な打球特性を明らかにし、その打球を放つためのバットスイングについて検討した。その結果を、以下にまとめる。

### 1) 打球方向別の打球特性の比較および打球特性が飛距離に及ぼす影響（研究課題1）

実際に打撃されたボールの打球方向別の特性を比較し、その特性が飛距離に及ぼす影響を検討した。その結果、引っ張り方向とセンター方向の境から左右に離れた方向、特に流し打ち方向へ放たれた打球にはサイドスピン成分が多く、大きな横向きのマグヌス力を受けて飛翔軌道が変化するため、飛距離が短くなることが明らかになった。そのため、打球のサイドスピン成分を減らすことができれば、飛距離の増大が期待できることが示唆された。

### 2) インパクト時のバットの上下方向の傾斜が打球の回転に及ぼす影響（研究課題2）

バットとボールのインパクト時のバット長軸の上下方向の傾斜角を変えることにより、サイドスピン成分を減らせるか否かについて検証した。その結果、実際に試合で打者が意図的に変えられるバットの傾斜角の範囲内では、打球のサイドスピン成分を減らすことは困難であることが明らかになり、左右に放たれた打球の飛翔軌道が横向きに変化することは避けられないことが示唆された。そのため、左右広角に飛距離の大きな打球を放つためには、打球のサイドスピン成分を少なくするのではなく、さらに打球速度を大きくする必要があることがわかった。

### 3) 左右広角に飛距離の大きな打球を放つための打球特性の定量化（研究課題3）

引っ張り方向、センター方向、流し打ち方向に飛距離の大きな打球を放つために必要な

打球特性を定量化した。その結果、例えば、100m の距離まで打球を飛ばすためには、引っ張り方向には 37.3m/s、センター方向には 38.0m/s、流し打ち方向には 39.8m/s の打球速度が最低限必要であり、最低限の打球速度で最大の飛距離を獲得するためには、約 20—40° の打球上下角で打球を放ち、かつ、少なくとも 20rps のバックスピン成分をボールに加える必要があることが明らかになった。

このように、本研究では、左右広角への打球飛距離を増大させるためには、打球速度を高めることが重要であることが明らかになった。そのためには、バットスイング速度を高めることが重要であると考えられる。また、本研究では、各方向のある距離まで打球を飛ばすために必要な打球速度も定量化することができた。ここで定量化した打球速度は、打者が打球速度を高めるための目標値として活用できると考えられる。

これまで、左右広角への飛距離を増大させることに関する研究は行われてこなかったため、実践現場では経験則に基づいた指導や練習が行われてきた。本研究により得られた知見は、指導者がより良い指導を行うこと、選手が明確な目標を持って効果的な練習を行うことに役立つものであり、選手の打撃技術の向上に貢献するものであると考えられる。

## 参考文献

- Adair RK (2002): The physics of baseball (3rd ed.). pp.16-22, 79-111. HarperCollins Publishers: New York.
- Alaways LW and Hubbard M (2001): Experimental determination of baseball spin and lift. Journal of Sports Sciences 19(5): 349-358.
- アメリカ野球指導者協会：平野裕一訳（2011）：野球一勝つための戦術・戦略. pp.27-29. 大修館書店：東京.
- Baseball Savant (online): Statcast Search. [https://baseballsavant.mlb.com/statcast\\_search](https://baseballsavant.mlb.com/statcast_search)  
(参照日：2020年8月29日)
- Cross R and Lindsey C (2005): Technical Tennis—Racquets, Strings, Balls, Courts, Spin, and Bounce. pp.87-117. Racquet Tech Publishing: California.
- Cross R (2011): Physics of Baseball & Softball. pp.261-277. Springer Science+Business Media: New York.
- 古田敦也 (2010)：フルタの方程式 バッターズ・バイブル. pp.90-91. 朝日新聞出版：東京.
- 池田哲雄 (2019)：内川聖一のバッティングバイブル. pp.34-37. ベースボール・マガジン社：東京.
- Jinji T and Sakurai S (2006): Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. Sports Biomechanics 5(2): 197-214.
- 勝亦陽一, 森下義隆 (2017)：高校野球選手における打球スピード向上を目的としたトレーニングの効果～PDCAサイクルに基づいた実践報告～. スポーツパフォーマンス研究 9: 369-385.
- Kensrud JR and Smith LV (2013): Spin from oblique impact of batted sports balls. Procedia Engineering 60: 130-135.
- 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.
- 城所収二, 矢内利政 (2017a): 野球打撃における左右への打ち分けに寄与する 2 つのインパクトメカニズム: 打球速度と各メカニズムの貢献. 体育学研究 62(2): 475-490.
- 城所収二, 矢内利政 (2017b): 野球における打ち損じた際のインパクトの特徴. バイオメカニクス研究 21(2): 52-64.
- 木村康宏 (2013): 野球の投手が投じる様々な変化球の特徴～移動速度, 回転速度, 回転軸の向きに着目して～. 早稲田大学修士論文.
- McIntyre DR and Pfautsch EW (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.
- 光川眞壽, 河村剛光, 佐賀典生, 澁谷智久 (2018): 野球のティー打撃における打球方向とスイング特性の関係—簡易型スイング特性分析器による検討. 野球科学研究 2: 13-29.
- 溝田 武人, 古賀勇輝, 加藤弘晃 (2009): 回転軸方向のわずかな変化にともなう硬式野球ボールの空力特性と軌道変化. 平成 21 年度日本風工学会年次研究発表会・梗概集.
- mlb.com (online): Barrel. <http://m.mlb.com/glossary/statcast/barrel> (参照日: 2020 年 8 月 29 日)
- 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.
- 森下義隆, 矢内利政 (2018): 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. 体育学研究 63(1): 237-250.
- 森下義隆, 勝亦陽一, 神事努 (2019): 空間上の打撃ポイントの違いがバットのスイング特性に及ぼす影響. 体育学研究 64(2): 463-474.
- Nagami T, Higuchi T, Nakata H, Yanai T, and Kanosue K (2016): Relation between lift force and ball spin for different baseball pitches. *Journal of Applied Biomechanics* 32: 196-204.

- 中島大貴, 桜井伸二 (2019): 野球における投球の回転が打球の回転に及ぼす影響. 中京大学体育研究所紀要 33: 89-92.
- Nathan AM (2008): The effect of spin on the flight of a baseball. American Journal of Physics 76(2): 119-124.
- Nathan AM, Cantakos J, Kesman R, Mathew B and Lukash W (2012): Spin of a batted baseball. Procedia Engineering 34: 182-187.
- 日本プロフェッショナル野球組織 (2019): 公認野球規則 2019 Official Baseball Rules. p.1. ベースボール・マガジン社: 東京.
- 及川研 (1995): 野球の打球の初速度・方向とその飛距離との関係について. 東京学芸大学紀要 第5部門 芸術・健康・スポーツ科学 47: 193-201.
- Sakurai S, Reid M and Elliott B (2013): Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. Sports Biomechanics 12(1): 23-29.
- Sawicki GS, Hubbard M and Stronge WJ (2003): How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories. American Journal of Physics 71(11): 1152-1162.
- 清水雄一, 鳴尾丈司, 柴田翔平, 矢内利政 (2015): 慣性センサを用いた野球スイングにおけるバット挙動の計測. スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演論文集 No15-21: A-21.
- 志村芽衣, 宮澤隆, 矢内利政 (2018): 『流し打ち』における打球速度を最大にする最適なバットの向きとボールインパクト位置. 体育学研究 63(1): 65-75.
- Szymanski DJ, DeRenne C and Spaniol F (2009): Contributing factors for increased bat swing velocity. Journal of Strength and Conditioning Research 23(4): 1338-1352.
- 鳥越規央 (2014): 勝てる野球の統計学—セイバーメトリクス. pp.21-42. 岩波書店: 東京.
- Winter DA (2009): Biomechanics and Motor Control of Human Movement (4th ed.). pp.176-199. John Wiley & Sons: New Jersey.



## 謝辞

本学位論文は、中京大学スポーツ科学部の桜井伸二教授の御指導のもとで作成されました。桜井先生には、学部のゼミから博士課程まで、7年間お世話になり、研究指導に留まらず、研究者としての在り方、考え方など本当に多くのことをご教授いただきました。桜井先生から学んだことは、私の人生における貴重な財産です。ここに厚く御礼申し上げます。

田内健二教授と光山浩人教授には、本論文の副査を引き受けていただきました。田内先生には、授業や研究セミナーにおいて、本論文を発展させるうえで大変貴重な御助言を頂きました。光山先生には、審査を通じて、他分野ならではの視点から、本論文を完成させるうえで大変有意義なご指摘を頂きました。心より御礼申し上げます。

立命館大学の森下義隆先生には、データ収集からそのデータの解釈に至るまで、多大なるお力添えを頂きました。同じ野球の研究を行う森下先生からの御助言はいつもの的確で、本研究を進めるうえで大変有意義なものとなりました。厚く御礼申し上げます。

中京大学硬式野球部の半田卓也監督をはじめ部員の皆様には、データ収集に際して多大なるお力添えを頂きました。ここに厚く御礼申し上げますとともに、硬式野球部の今後の益々のご活躍を祈念いたします。

中京大学大学院体育学研究科応用スポーツ科学系の先輩方、大学院生の皆様には、データ収集にご尽力いただいただけでなく、データ分析やその解釈に至るまで、手厚いご支援を頂きました。また、皆様と将来研究者になることを夢見て、研究や将来のことについて語り合った日々は、私にとってかけがえのない時間となりました。本当にありがとうございました。

最後に、大学院での生活を温かく見守り、支えてくれた家族に感謝します。

皆様、本当にありがとうございました。

2021年1月 中島 大貴