

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

野球打撃における流し打ち技法の
3次元シミュレーション分析

A three-dimensional simulation analysis of
various hits toward the opposite field in
baseball

2021年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

志村 芽衣

SHIMURA, Mei

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第1章 緒論

1. 序 1
2. 研究小史 5

第2章 『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：野球のインパクトシミュレーション

1. 緒言 29
2. 方法 31
3. 結果と考察 38
4. まとめ 49

第3章 『流し打ち』におけるバットの向きとボールインパクト位置の違いによる

飛翔特性変化：野球のインパクトシミュレーション

1. 緒言 50
2. 方法 52
3. 結果と考察 56
4. まとめ 69

第4章 総括論議：野球の実用書に記された『正しい』流し打ち技法の数理的評価

1. 緒言 70
2. 流し打ち技法を構成する運動力学的要素に関するまとめ 73
3. 流し打ち技法を構成する技術要素の数理的検証 75
4. 結論 83

補足 84

参考文献 85

第1章 緒論

1. 序

「野球のボールを打つことはむずかしい。単一のプレーでこれほどむずかしいことは、他のあらゆる競技を探しても見当たらない。」「打撃の神様」の異名を持つテッド ウィリアムズは自身の著書「テッド・ウィリアムズのバッティングの科学」(テッド ウィリアムズ, 2000, p.102) でこのように述べている。さらに、バッティングの3原則の1つとして **Proper thinking** (適切に思考すること)、つまりバッター・ボックスに立って相手の投球を推測・予測することが重要であるとも述べている。通算本塁打 755 本の記録を持つハンク・アーロンも、攻撃時に「どういう試合展開か、ピッチャーがどんなボールを投げているか、カウントはどうかといったことを考えなければならない」と述べており(ハンク アーロン, 2011, p.13, pp.26-27), 野球の打撃における状況判断の重要性を強調している。

状況に応じた打撃の戦術として送りバントやスクイズ、ヒットエンドランが広く用いられている。これらを成功させるには、打球の勢いを弱めたり一・二塁間や三遊間等、内野手のいない方向に狙って打つことを可能にするバッティング技術が必要である。また、打者は状況に応じて打球を左翼方向や右翼方向を狙って打ち分けることも多い。野球のバッティングにおいて打撃技術の向上が求められる技法のひとつとして、右打者が右翼方向へ、左打者が左翼方向へ打球を放つ『流し打ち』打撃がある。篠塚和典氏は「打率を残したいと思ったら、逆方向に打つことつまり、「流し打ち」を心掛けることが大切です」と述べている(篠塚, 2013, p.81, pp.122-123)。また、同氏は外角球の流し打ちについて、「「コースに逆らわずに打つ」というバッティングの基本を考えると、外角球は最も流し打ちをしやすいボールだと言える。外角球を打つときはバットが通常よりも遅れて出ていくので左打者で言うと、センターから左方向に打球が飛びやすくなるのは当然である。」とも述べている。つまり、スイングのタイミングを調節し捕手寄りの位置でボールをインパクトすることによりバットの打撃面が左翼方向(左打者の場合)を向くため、打球を左

翼方向に打ち出しやすくなるというのである。一般的には、「アウトコースはボールが目から離れているため、しっかりボールをとらえる確率は低くなる」(小早川, 2007, pp.78-81)といわれていることから、センター返しや引っ張りだけでなく、流し打ちの技術を向上させることで安打の確率を上げることができると考えられる。また、右打者による流し打ちは走者を進塁させやすく、左打者による流し打ちは内野安打になりやすいという利点があるため、僅差の試合の勝因を分けるチームバッティングとして効果的であることから、流し打ちは打率アップ、チームの得点力向上という面においても重要な打撃技術の1つとされている。

流し打ちにおける打球の飛翔方向は、水平面上で生じる2次元的な衝突現象として、バットの水平面上の左右への方位が投球に対して入射角を生じさせ、この反射角によって打球が左右に放たれるという力学的解釈(以降、第1メカニズムと記す)で説明されてきた(McIntyre and Pfautsch, 1982)。これは言い換えると、水平面上(2次元)の斜衝撃として、バットの打撃面を流し打ち方向へ向けてボールを打撃する方法とすることができる。このメカニズムに加え、近年の研究(城所・矢内 2015)によって、流し打ちの実施にはバットの打撃面を必ずしも流し打ち方向へ向けてインパクトする必要はなく、①バットヘッドがグリップエンドよりも低くなるように傾いたバットの上面で、②ボールの下部を打撃することによるバットの横断面上での斜衝撃を伴った3次元的なメカニズム(以降、第2メカニズムと記す)によってもそれが可能になることが示された。つまり、打球の左右方向への角度は、インパクトの瞬間のバットの水平面上の方位(以下、「バット水平角」と呼ぶ)だけではなく、鉛直面上の方位やインパクト位置のバット短軸成分の影響も受けで決定されるのである(図 1-1)。このように、流し打ちの実測研究(城所・矢内, 2015, 2017a)では、量的研究として具体的にバッティングデータを数値化することで、バットヘッドを下向きに傾斜させた際の流し打ちの利点について新たな知見が得られている。

インパクトの瞬間において水平面上に投影したバットの向きが同じであっても、バットが鉛直面上で傾いている場合はボールとバットの短軸上のインパクト位置によって左右へ

の打球方向は異なる。つまり、ある方向（例えば右打者が一・二塁間）に打球を放つためのバットの向きやインパクト条件は一通りではなく、インパクト時のバットの方位（水平面への投影角と鉛直面への投影角）とバット短軸上のインパクト位置の組み合わせにより、無数の可能性が考えられる。これらの組み合わせによってインパクト後の打球特性は様々に変化すると考えられるが、どのような組み合わせによって、ある決まった方向に勢いのあるライナー性の打球、または、大きな飛距離の打球を放つことが可能となるのかは分かっていない。

人を対象とした打撃実験では、どんなに熟練した選手であっても試技ごとにバットスイングの速度や角度等が異なるため、2つのメカニズムを規定する各因子を意図的に変化させその影響を個別に抽出することは困難である。一方、シミュレーションを用いたバッティングの分析では、バットの方位とバット短軸上のインパクト位置のみを変数とし、その他のスイング条件を一定にすることで、変数単独の要素がどれだけ影響を及ぼすかを検証することが可能となる。そこで、本学位論文では、野球のバッティングについて、弾性体モデルによる3次元インパクトシミュレーションを行い、『流し打ち』において、①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の組み合わせ、および②バットの向きとボールインパクト位置の違いによる飛翔特性変化を検証し、③意図した方向へ精度高く打球を放つことのできる流し打ちのスイング技術の特徴を明らかにすることを目的とした。

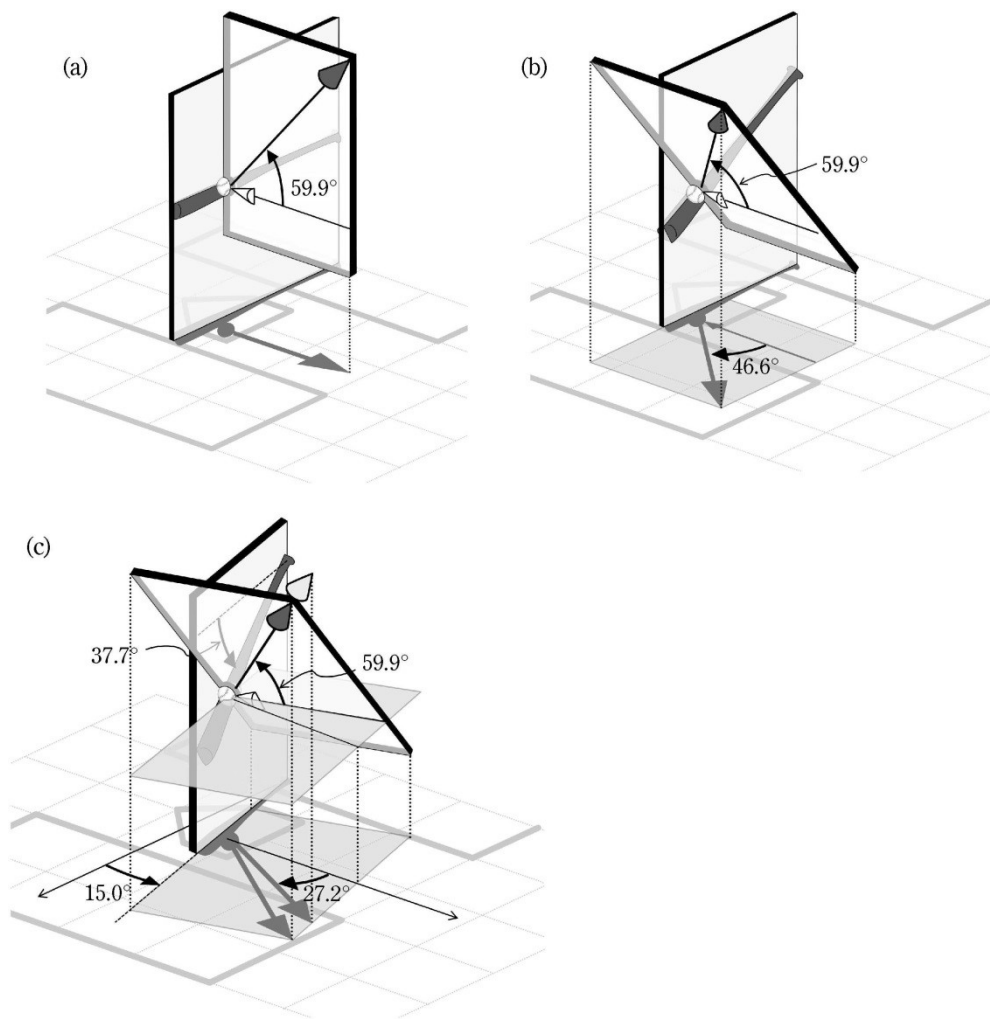


図 1-1 流し打ちのメカニズムの一つ. 城所・矢内 (2015) 野球における「流し打ちを可能にするもう一つのインパクトメカニズム. 日本体育学会. から転載

2. 研究小史

野球は日本における国民的スポーツの1つで、幅広い世代が競技を実践または観戦していることに加え、競技力向上を支援する科学研究も多数行われている。野球の技術に焦点をあてた動作解析研究は数多く、そこから得られた知見や方法論を現場に活かす取り組みのひとつとして、指導の現場においても映像が活用されるようになっている。研究による「科学」と現場における「実践」をうまく融合することが今後更に求められ、これが野球の発展につながると考えられる。

流し打ちの打撃技術は研究者からも着目されており、打撃動作を引っ張り打ちと比較し、バットの運動に着目した研究 (Gelinas and Hoshizaki, 1988 ; McIntyre and Pfautsch, 1982) やティー打撃において外角球を流し打ちした際の身体運動を分析した研究 (田子ほか, 2006), 打球を左右へ打ち分けるインパクトメカニズムに関する研究 (城所・矢内, 2017) など様々な観察研究が行われている。そこで、本研究小史では 1:バットとボールの基本的なインパクトメカニズムを検討した研究, 2:流し打ちを成功させるために求められるバッティング技法を調査した研究, 3:打球方向別のスイングの特徴について取り上げ、これまで明らかにされてきた野球のバットとボールのインパクトおよび流し打ち打撃に関する知見と、その問題点について検証する。

2.1. バットとボールの基本的なインパクトメカニズム

バットとボールの基本的なインパクトメカニズムについて、物理学の観点から質的な解釈をした上で、シミュレーションや実験的に導き出された量的な研究結果から、これまで明らかにされてきた内容をまとめる。はじめに、衝撃の分類をする。2 物体間に起る衝突は、非常に短い時間間隔で起り、その間 2 物体は互いに比較的大きな力を作用し合う。この衝突は衝撃 (impact) と呼ばれている。衝撃の間、接触している面の共通法線は衝撃線とよばれる。もし、衝突している 2 物体の質量中心がこの線分上にあるならば、衝撃を中心衝撃 (central impact) という (ベアー and ジョンストン, 1998, pp.604-605)。2

質点の速度が衝撃線に沿って向いているならば、衝撃は直衝撃 (direct impact), それに反し、質点のいずれかまたは 2 つの質点が衝撃線以外の線分に沿って動くとき、衝撃は斜衝撃 (oblique impact) といわれる。

この分類を野球に応用する。現実には、バットとボールの衝突は並進・回転運動および振動を伴う複雑な現象として捉えられる。しかし、バットの有効質量が実際の質量と等しくなる質量中心でのインパクトと仮定し、ボール・バットの衝突を両者の接触点からなる 2 点間の 1 次元的な正面衝突つまり、直衝撃 (direct impact) と見なすことで比較的容易に扱うことができる。衝突後のボールとバットの速度は、運動量保存の法則および、2 物体間の衝突における弾力性を表す指標としての反発係数の式を用いて算出が可能となる。

Hester and Koenig (1993) は、投球速度とインパクト直前のバット速度が打球速度に関連することを初めて報告した。

バットの長軸方向のインパクト位置に関して、重心を外したインパクトは偏心衝突と呼ばれ、厳密には直衝撃とは定義されない。そのため、バットの長軸方向のインパクト位置と並進・回転運動を考慮に入れた衝突モデルでは、斜衝撃を伴わない 2 次元平面での正面衝突として捉えることができる。バットの長軸方向のインパクト位置は各打撃によって異なり、さらにバットが衝突前後に回転することによる角速度も変数として加わるため、直衝撃の数式よりも複雑であるが、より現実に近づくモデルとなる。インパクト時のバットの打撃面の向きに関する研究について、Kirkpatrick (1963) は、運動量保存と反発係数についての物理法則を用いて、バットとボールのインパクト時のバットに対するボールの入射角と反射角の関係性を説明している。Hay (1978) も上記の物理法則を用いて、インパクト後のボール速度と反射角を求める方程式を導出している。この方程式の入力変数 (インパクト前のボール速度やボールの入射角、バット速度) に様々な値を入力することで、インパクト後のボール速度や反射角がどのように変化するのかを算出した結果、入射角の変動が反射角に大きな影響を与えることを示した。これらのシミュレーション分析では、斜衝撃における摩擦は考慮されておらず、バットとボールのインパクトを水平面上の

現象として2次元解析している。一方、McIntyre and Pfautsch (1982) は実測研究を実施している。打球を左右方向へ打ち分ける引っ張り打撃や流し打ち打撃につながるような、バットの長軸方向のインパクトメカニズムを調査した研究はこれまでなく、左右への打ち分けに関する研究は動作の特徴の違いを検討したものは McIntyre and Pfautsch (1982) によるものだけである。この研究では、頭上から打撃フォームを撮影し、水平面上で生じる2次元的な衝突現象として、バットの水平面上の左右への方位が投球に対して入射角を生じさせ、この反射角によって打球が左右に放たれるという力学的解釈(第1メカニズム)を説明し、引っ張り打撃と流し打ち打撃の動作を比較分析している。さらに、引っ張り打撃よりも流し打ち打撃の方がインパクトの瞬間にバットの打撃面がより大きく右翼側(右打者を想定)へ向いていたことを報告し、左右への打球方向を決定する要因として、この唯一無二のメカニズムが重要であると述べている。

バットの打撃面は曲面状になっていることから、インパクト時には水平面上で観察される斜衝撃に加えて、バットの横断面上で観察される斜衝撃も考慮しなければならない。野球におけるバットの短軸方向の衝突を述べるにあたり、「衝撃線」は物理の専門用語で、その定義は衝突する2物体の接触面に対して垂直に交わる直線のことを指しているが、本研究では、これを近似する直線としてバットの横断面中心からボールの中心に向かうベクトルと水平面とのなす角を衝撃線角度と呼ぶこととする(図1-2)。さらに、バットの横断面中心とボールの中心を結ぶ線分の鉛直投影成分 D を Sawicki et.al. (2003) の定義と同様、アンダーカット距離と呼ぶこととする。このアンダーカット距離 (D) の影響による打球特性の変化は剛体モデルを用いたシミュレーションで報告されている (McBeath et al., 2008)。アンダーカット距離と打球速度、打球の角速度、打球角度の関連を図1-3に示す。投球条件およびスイング条件を一定(両速度ベクトルともに鉛直成分を0と仮定)とした時、アンダーカット距離が0となる直中心衝撃時に打球速度が最大、かつ、打球の角速度、打球角度が最小となることから、ライナー性の打球が放たれることが示される。一方で、アンダーカット距離が大きい、つまりボールの下部を打撃する時には打球の速度

が低下し、打球の角速度と打球角度が共に高くなるフライとなる打球が放たれることが示される。

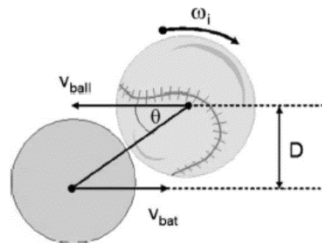


図 1-2 ポール・バット衝突の幾何学. ボールおよびバットの初速度はそれぞれ v_{ball} と v_{bat} . 投球されたボールの角速度は ω_1 . アンダーカット距離 : $D = (r_{ball} + r_{bat})\sin\theta$. r_{ball} および r_{bat} はそれぞれボールおよびバットの半径. McBeath et al. (2008) Paradoxical pop-ups : Why are they difficult to catch? American Journal of Physics. から引用

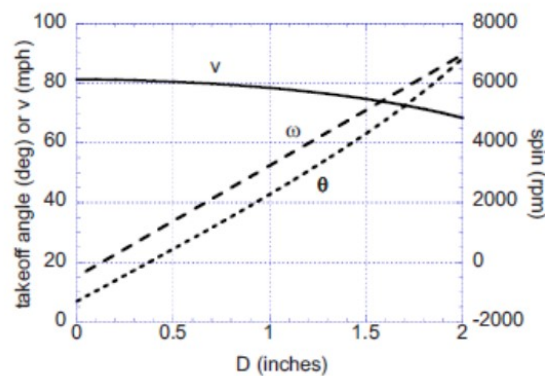


図 1-3 アンダーカット距離による打球速度，打球角度，打球の角速度の変化.

McBeath et al. (2008) Paradoxical pop-ups : Why are they difficult to catch?

American Journal of Physics. から引用

ここまでは、剛体近似によるインパクトモデルの概念をあてはめてバットとボールの運動を検討してきた。しかし、インパクトにおいて、バットとボールが正面衝突した場合に

は、ボールの変形が大きく、接触時間が長くなると予想される。また、バットがボールの芯に当たらずファールチップやポップフライとなる場合には、ボールの変形は小さく、接触時間は短くなると予測される。衝突中、バットがボールに力を加え、ボールを圧縮し、瞬間的に止まり、その後ボールは方向を変えて最初の形に戻ろうとバットに力を及ぼす。このとき本来あった運動エネルギーの大部分がボールの内部構造の中で散逸される。この内部摩擦のために運動エネルギーが保存しない非弾性衝突は反発係数で表わされ、2 物体衝突での反発係数は衝突前に対する衝突後の相対速度の比と定義されている。しかし、剛体モデルではインパクト中のボールの変形によるエネルギーの分散の影響は、直衝撃とみなして設定したものであると考えられるため、反発係数については打球速度を過大評価している可能性がある。このように、実際のバッティングにおいて、インパクトの瞬間にボールは変形し、バットは振動でしなるが、剛体モデルではバットの振動、ボールの変形およびバットとボールの接触時間などが考慮されていない。この限界を克服する方法論の一つとして、有限要素法を用いた弾性体モデルによる分析が行われるようになった。剛体モデルを用いた研究では、硬式ボールと木製バットでのスイング条件やインパクト条件の違いが打球特性に及ぼす影響など、現場での実戦に応用可能な検証が行われている (Cross and Nathan, 2006 ; Sawick et al., 2003) が、その一方で、弾性体モデルでは、バットの材料・形状特性に着目した研究 (神田・鳴尾, 2007 ; Smith et al., 2001 ; Shenoy et al., 2001 ; Nicholls et al., 2006) や、野球ボールの衝撃力や変形挙動を解明した研究 (Nicholls et al., 2006 ; Shenoy et al., 2001) が主で、実際の打撃に直接結びつくものは少なかった。近年では、宮澤ほか (2011) は弾性体モデルを用いたシミュレーションによるバッティング分析の妥当性を検証し、投球されたボールとバットスイングの運動学的数値を入力することで、センター方向へ飛翔した打球の速度、角度、角速度を高い精度で算出できることを確認した。この研究では、バットとボールは 3 次元でモデル化されているが、シミュレーションの入力値 (投球・スイング・インパクト条件) および出力値 (打球特性) については、2 次元平面で分析可能な試技のみを対象としている。

このように、バットの水平縦断面と鉛直横断面で観察される斜衝撃については、これまで別々に各々独立した平面運動として研究が行われてきた。しかし、実際の試合において、打者はセンター返しの打球だけではなく、状況に応じて打球を左右に打ち分けている。そのため、打球の左右方向への角度を決定させる要因を詳しく分析するには、水平面とバット横断面の両面上での斜衝撃について考慮し、3次元運動として捉える必要がある。このことを発見し、そのメカニズムを紐解いたのが城所・矢内(2015)である。彼らはボールインパクト時にバットヘッドがグリップエンドよりも低くなるように傾いた状態で、ボールの下部を打撃することにより、右打者の場合にライナーまたはフライが右翼方向に放たれることを報告し、この仕組みを説明した。すなわち、ボールとバットの挙動を鉛直横断面上の2次元運動でのインパクトとして捉えると、それぞれの表面が円形であることからインパクト位置がボール中心を外した場合に斜衝撃となる。さらに、ボールの下部をバットの上部でインパクトした際、バットのスイング軌道に関わらずボールの飛翔軌道が飛来した軌道よりも上方向に飛翔するのは、鉛直横断面上の斜衝撃によるものである。このような原理によって、流し打ち方向へ打球が飛翔することから、このメカニズムを「第2メカニズム」と呼んだ。その結果、打球方向を変動させるメカニズムは、(1)水平面上でバットの向きを調節することによる左右への打ち分け(第1メカニズム)と(2)バットヘッドを下向きに傾斜させてボールの下側や上側を打撃することによる左右への打ち分け(第2メカニズム)の2つとなった。第2メカニズムを説明する因子は、ボールがバットの横断面上のどの位置に衝突したかを示す角度である衝撃線角度とインパクト時のバットヘッドの鉛直面上における下向きの傾斜角度(俯角、以下「バット鉛直角」と呼ぶ)である。城所・矢内(2017a)は実際の打撃実験における各メカニズムの貢献度を算出し、「実際の打撃では、どちらか一方のメカニズムによって打球が放たれるわけではなく、2つのメカニズムによる影響が反映された打球となるため、同じ方向への打球でも、その力学的要因は打撃ごとに異なる」と報告してい

る。これらの2つのインパクトメカニズムは、流し打ち分析を行う上で、物理的に解釈する際の基本原理となる。

2.2. 流し打ちを成功させるために求められるバッティング技法を調査した研究

流し打ちを成功させるために求められるバッティング技法を先行研究に基づき調査し、実用書および学術論文で述べられた内容をまとめた。流し打ちの実践方法や習得方法について述べられた実用書と流し打ちの打撃技術やメカニズムを分析した学術論文に基づいて流し打ち技法を構成する運動力学的要素を列挙した。さらに、実用書と学術論文で記された流し打ちの成功に求められる共通点および相違点を検証した。

実用書

野球に関する実用書については、国立国会図書館オンラインで「野球 バッティング」、 「野球 打撃」をキーワードとして、東京本館・図書カウンターで閲覧可能な図書を検索・収集した（「野球 バッティング」で62件、「野球 打撃」で149件ヒットした）。そのうち、流し打ちの実践方法を解説・指導する内容を含む書物で、スイング動作またはバットとボールの挙動について着目したもののみを抽出し、さらにこれらの書物以外に、閲覧・入手可能であった書籍などを加えて、計21件で述べられている内容をまとめた。

実用書には、流し打ちをする際に「ヘッドを遅らせる」という表現が多く用いられている（江藤, 2011, p.116；本間, 2007, p.62；元木, 2008, p.40；佐相, 2017, p.117；篠塚, 2013, p.84；篠塚, 2014, p.94；角, 2001, p.187；立浪, 2011, p.51；得津, 2009, p.76；山本, 2000, p.126；全国野球振興会編, 2003, pp.164-165）。 「ヘッドを遅らせる」ことによって流し打ちを行うメカニズムは、著者によって表現は多少異なるが（表 1-1）、凡そ次のように説明されている。すなわち、グリップエンドに対してバットヘッドの始動を遅らせてスイングし、「ミートポイントを捕手寄り」（江藤, 2011, p.116）にしてインパクトすることで、右打者の場合、バットの打撃面が右翼方向を向くため、打球が右翼方向へ飛びやすくなる（篠塚, 2013, p.84）。

流し打ちをする際には「バットのヘッドを下げるな」（成美堂出版編集部, 2005, p.73；Baseball Skills 編著, 2007, p.15）という指導の必要性についても多数の実用書に記され

ている。低めのボールを打つときなどは、「バットのヘッドが下がりやすく」なり（立浪, 2011, p.48 ; 篠塚, 2013, p.55), 力強い打球を正確に流し打ち方向放つことが困難になるとの経験値や考えが基盤になっているものと推察される。ヘッドを過度に下げて流し打ちした際には、「逆方向にファウルフライが上がったり, 逆方向へ流し打ちをした打球が切れたり」(齋藤, 2011, p.135), 「ボールはスライス回転し, 右打者であれば弱々しいボールが一塁方向へのファウルに流れてしまうことになる」(古田, 2010, p.90)。篠塚氏は著書『流し打ちの極意』の中で、「バットが下から出て, ヘッドがバットのグリップの高さよりも下がってしまう」スイングでは「力もうまく伝わらない」(篠塚, 2013, pp.54-55)と述べている。そのため, ボールインパクト時に, 「手首を立ててヘッドの利いた状態にする」つまり, 両手部を上下に並べ, ヘッドを高い位置に維持するようにスイングする必要性があり, このようなスイングができれば, 「ボールに強い力を与えられる」(篠塚, 2013, p.55)と述べられていることから, ヘッドをグリップより過度に下げないスイングで流し打ちを行うことが重要と言える。

実用書から抽出したプロ野球選手や有名コーチの経験に基づいた記述によると, 流し打ちを『正しく』行うには, 主に, [1]捕手寄りの位置でボールをインパクトすること, [2]インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること, [3]ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすることが重要とされていることが明らかになった。以上のように実用書に記されている様々な現場の声・言葉を総合的にまとめることによって見出され推奨された流し打ち技法を本研究では『正しい』技術と表現することとする。表 1-1 に, この 3 項目に関して各書物で記されている表現をまとめ, さらにこれらを実現するための手法を整理して示した。これによると, [1]~[3]を実践するためには, 主に下記のようなイメージングやスイング動作を心がける必要があるとされている。

[1] コースに逆らわない (つまり, インコースは引っ張り, 真ん中はセンター返し, アウトコースは流す) で打撃すること

[2] バット加速時に右脇 (右打者) をしめ, グリップをヘッドに先行して突き出すことに

より、バットをインからアウトの軌道でスイングすること

[3] 加速時に左脇（右打者）をしめ、手首を立ててスイングすること

表 1-1 実用書における流し打ちの技術・指導に関する記述のまとめ

1. 捕手寄りの位置でボールをインパクトすること

1.捕手寄りの位置でボールをインパクトすること	
山本 (2000)	外めのボールを引きつけて打ち返す(pp.124-125, l.1) 流し打ち時には、バットを長めに持つことでアウトコースのボールにも対応できるようになる(p.126, l.2-5)
角 (2001)	ポイントを遅らせる(p.187, 左l.24)
篠塚 (2002)	アウトコースのボールをコースに逆らわないでスイングすれば、バットにボールがミートする角度から、右側(ライト方向)へ打球は飛ぶ(p.104, 右l.2-6)
若林ほか (2006)	外角に向けたスイングを始動する際、キャッチャー寄りでインパクトをむかえることが理想的(p.110, 左l.5-7)
本間 (2007)	アウトコースの投球をねらって、キャッチャー寄りで打つ(p.62, l.2-3)
Baseball Skills 編著 (2007)	ボールをギリギリまで呼び込んで打つ(p.155, 中央l.1-3)
江藤 (2008)	ミートポイントは内角球に比べるとキャッチャー寄りになるので、できるだけ引きつけて打つ(p.54, 下段左l.11-12)
得津 (2009)	アウトサイド打ちの基本は必ず反対方向へ打つこと(p.59, 中段l.1-3) 体の前でなく捕手寄りでとらえるようにする(p.112, l.11-13)
古田 (2010)	バッティングポイントはインコースの球は投手寄り、アウトコースは捕手寄り(p.25, l.7-10) アウトコースのボールを力強く弾き返すには、ポイントをキャッチャー寄りに置いて、「後ろの手で打つ」という癖をつける(p.90, l.10-12)
江藤 (2011)	ポイントは内角球や真ん中よりも捕手寄りで、体が前には出ない(p.116, l.12-13)
篠塚 (2013)	「コースに逆らわずに打つ」というバッティングの基本を考えると、外角球は最も流し打ちをしやすい(p.84, l.4-5)
全国野球技術研究会編 (2013)	ボールの勢いを利用してコースに逆らわずに打ち返す(p.134, 中段l.1-3) 左バッターならアウトコースはレフト方向へと打ち返す(p.134, 中段l.4-7)
川村 (2014)	アウトコースのボールはグッと体を寄せて(踏み込んで)、逆方向へ打球を飛ばす(p.67, 下段l.15-17)

2. インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること

2.インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること	
山本 (2000)	アウトコースにボールがきたら見逃さずに、グリップエンドをボールの方向へ突き出し、ヘッドが遅れて出てくるようにスイングする(p.126, l.18-23) ボールをしっかり引き込み、わきを締めて振り抜く(p.129, 右l.13-15)
角 (2001)	インサイド・アウトのスイングでバット・ヘッドを遅らせる(p.187, 左l.24-25)
篠塚 (2002)	右わきを締めて振り出す動きは、ボールを引きつけて打つということにつながる(p.109, 左l.7-8, 右l.1-3) 引っ張るときよりも1テンポ遅らせて、グリップより先にバットヘッドが出ないようにインパクトする(p.127, 右l.8, 左l.1-2)
全国野球振興会編 (2003)	右方向へ打つには、わきを締めてヘッドを遅らせぎみに出す(p.164, l.1-2) バット全体を遅らせるような気持ちでステップし、ボールの内側を打つようにする(p.165, l.4-5) 右腕のヒジを意識して閉めるようにする(p.165, l.6)
成美堂出版編集部 (2005)	右ヒジをたたくで上手くヘッドを走らせる(p.42, l.6-8)
若林ほか (2006)	外角にくると判断した時点で、グリップエンドを外角に向けることでバットのヘッドを残したスイングをする(p.110, 右l.7-8, p.111, l.1-2)
本間 (2007)	アウトコースの場合には、余裕を持ってボールを引き付け、グリップエンドをボールに突き出すようにしながらヘッドが遅れてくるようにスイングする(p.62, l.6-8)
Baseball Skills 編著 (2007)	右脇を締め、バットのヘッドを押し出すようにして打つことで、バットにロスなく力が伝えられ、右方向にも強い打球が打てる(p.116, l.12-17)
江藤 (2008)	右ヒジを体の近くに寄せて、バットのヘッドをやや遅れぎみにしてボールをぶつけるスイング(p.54, 下段右l.2-3)
元木 (2008)	右方向へ打つためには一塁側にバントするときのようなバットの角度を作り出せばいい。そのためには、右バッターの場合はヘッドを先に出してはいけない。グリップから先に出していき、ヘッドを遅らせてミートする(p.40, 上段l.6-11)
得津 (2009)	バットヘッドを遅らせて、体を開かず打つ(p.76, l.1-2) 早く手を返さない。グリップの返し早いと、引っ張った打球になる。(p.59, 中段l.4-8)
吉田 (2010)	バットを「インサイドアウトに」出す癖をつけ「手首を返さないで打つ」(p.92, l.7-9)
江藤 (2011)	左打者の場合バットは左脇を締めて、ヘッドを少し遅れぎみに出すのがコツ。グリップをトップの位置から体の近くを通し、左ヒジをへその前に出すようにすると、うまくヒジがたためてバットはインサイドアウトに出るため強い打球を打つことができる(p.116, l.13-19)
立浪 (2011)	バットの出し方としては「上から」ではなく「内側から」を強く意識することで、ボールに対してバットを最短距離で出す「インサイドアウト」のスイングにつながる(p.46, l.1-3) 右バッターであれば右ヒジをスイングの過程でみぞおちのあたりに入れていく。バットの動きとしては、グリップエンドの部分をピッチャー方向へ差し込む感覚で振る(p.46, l.5-7) バットのヘッドが遅れて出ていったとき、バットの「面」は自分にとって「逆方向」と正対する位置関係になっている(p.51, l.11-12) バットの面が逆方向と正対する位置関係で振り出すことができれば、逆方向へのバッティングが可能となる(p.51, l.14-15)
井端 (2013)	ボールの内側にバットを入れて、ヘッドが遅れないことに気を付けて押し出す(p.116, l.3)
篠塚 (2013)	「ヘッドが遅れて出る」というバットの動きが必須条件(p.84, l.11-12) バットの面を逆方向へ向ける意識が大切(p.84, l.17) 外角球に対して逆らわずにバットを出していけば、自然とヘッドが遅れて打球は逆方向に飛ぶ。バットが遠回りして手首が早く返ってしまわないようにする。後ろの手でバットが体の近くを通るようにスイングしていき、バットの面を逆方向に向けて、手首のコックがほどけるのをギリギリまで我慢する(p.82, l.2-5)
篠塚(2014)	「ヘッドが遅れて出る」というバットの動きが必須条件(p.94, 右段l.16-17) バットの打撃面を逆方向へ向けて振る。(p.94, 右段l.25-26, p.96, 左段l.1) 外角球に対して逆らわずにバットを出していけば、自然とヘッドが遅れて打球は逆方向に飛ぶ。バットが遠回りして手首が早く返らないようにする。後ろの手でバットが体の近くを通るようにスイングしていき、バットの面を逆方向へ向けて手首のコックが解けるのをギリギリまでガマンできるとうまく流し打つことができる。(p.97, 図注釈l.1-16)
佐相 (2017)	ヘッドを遅らせることでボールを引き込んで、ヘッドの返しを利用して逆方向に弾き返す(p.117, l.10-12)
川村 (2014)	体をアウトコースへ寄せていき、通常通りにインサイドアウトでボールを捉える(p.67, 中段l.12-14) バットのヘッドを返さずに、固定した状態で逆方向に打つ(p.122, l.4-6) ライト方向へバットを放り投げるイメージで打つ(p.122, l.22-23)

3. ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること

3.ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること	
成美堂出版編集部 (2005)	右打ちをする時は、バットのヘッドが下がらないようにする(p.73, 下段l.1)
Baseball Skills 編著 (2007)	確実な右打ちをおこなうために、ヘッドが下がらないように注意する(p.15, 中央l.2-5) しっかりと脇を締めてリストを効かせたバッティングによって、ヘッドも走り、右方向へ鋭い打球が打てる(p.154, l.8-12)
古田 (2010)	ヘッドが下がった状態でボールに当たると、ボールはスライス回転し、右打者であれば弱々しいボールが一塁方向へのファールに流れてしまう(p.90, l.5-8) ヘッドを立てるためには「後ろの手を立てる」イメージ(p.90, l.13-15)
齋藤 (2011)	逆方向にファウルフライが上がったり、打球が切れたりするのは、外角高めのボール球に手を出し、ヘッドが倒れた状態で打っていることが大きな原因(p.135, 左l.1-7)
立浪 (2011)	ピッチャー側の腕のワキを開けない。ワキが開いてしまうと、たとえ後ろのヒジがしっかりみぞおちに入っても、インパクトの瞬間ではバットのヘッドが下がりがやくなる。バットのヘッドがグリップよりも下がってしまうと、バットに力が入らなくなる。(p.46, l.15-16. p.48, l.1-2) 実践で低いボールを打とうとすれば、どうしてもバットのヘッドはグリップよりも下の位置にくる。しかし、バットに最大限のパワーを伝えるためにはバットのヘッドがグリップよりも上の位置を回るようにスイングする。「ヘッドを立てる」イメージ。(p.48, l.6-9) ワキを締め、グリップの位置よりもヘッドが下がらないように振る。(p.48, l.11-12)
篠塚 (2013)	バットが下から出て、ヘッドがバットのグリップの高さよりも下がってしまう、こうしたスイングでは力もうまく伝わらない(p.54, l.6-p.55, l.1) 実際、低めのボールを打つときなどは、バットのヘッドも少し下がるもの。手首を立ててヘッドの利いた状態にすることができていれば、ボールに強い力を与えられる(p.55, l.3-5)
佐相 (2017)	アウトコースを打つ時は、バットを立てて、肩の下辺りからヘッドが出て、さらにバットを外に放り出すイメージで振る(p.96, l.3-4) ヘッドが下がらないように、「アウトコースを引っ張る」イメージで打つことが大切。「アウトコースを流す」とイメージすると、ヘッドが下りがちになり、パワーが伝わらず強い打球が飛ばなくなる(ファールにもなりやすくなる)(p.96, l.9-12)

学術論文

「流し打ち」に関するスイング動作とインパクト時のバットとボールの挙動に着目した科学研究についてまとめた。参考文献の検索には学術データベース CiNii を活用し、「流し打ち」「opposite filed hitting」をキーワードとして検索・収集した結果（「流し打ち」11件、「opposite filed hitting」14件ヒットした）、重複を除き5件の学術論文が抽出された。さらに補足として、「Google Scholar」を活用し、上記検索エンジンでは検索されなかったものの、レビューを進める上で重要だと思われる「流し打ち」に関連する学術論文、学術専門誌を収集し、計14件で述べられている内容についてまとめた。

1) 「捕手寄りの位置でボールをインパクトすること」に関する記述

城所・矢内 (2017b)、金堀ほか (2017) によるフリー打撃での実測研究において、「打球されたボールがインコースへの投球に対しては投手寄りで、アウトコースへの投球に対しては捕手寄りでインパクト」すると述べられている。さらに、森下ほか (2012) の試合中の実際の打撃や、城所・矢内 (2017b) のフリー打撃による実測研究では、打球方向に関しても、「打球は投手寄りでのインパクトほど引っ張り方向に、捕手寄りでのインパクトほど流し打ち方向に飛翔する」と報告されている。これら結果は、実用書において流し打ちを『正しく』行うには「捕手寄りの位置でボールをインパクトすること」が必要であると述べられている内容と一致している。

2) 「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること」に関する記述

McIntyre and Pfautsch (1982) は、頭上から打撃フォームを撮影した実測研究において、ボールとバットの衝突を水平面上で生じる2次元運動として捉え、引っ張りや流し打ちの動作について分析している。その結果、引っ張りよりも流し打ちの方がインパクトの瞬間にバットの打撃面がより大きく右翼側（右打者を想定）へ向いていたことを報告している。また、複数のカメラを用いて行った実測による3次元分析においても「インパ

クト時にバットの打撃面を狙った方向に向ける必要がある」と同様の内容が述べられている(森下ほか, 2012 ; 森下・矢内, 2018 ; 城所・矢内, 2015, 2017a). さらに, 城所・矢内(2015)の研究では, 「バットの打撃面をライト側へ向けた流し打ちは, 全体の 7 割を超えていた (78.3%)」と具体的な数値結果で示している. 一方で, 城所・矢内(2015)は, 「流し打ち方向に打球が放たれたにもかかわらず, バットの打撃面がレフト方向に傾斜したインパクトが全体の 16.4%に相当」したとも報告している. つまり, 実用書において流し打ちを『正しく』行うには, 「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向ける」必要があるという概念は文字通りの絶対的な意味を有するものとして解釈すべきではなく, 相対的な意味を有する表現として, 引っ張り打撃時に比べてバット打撃面をより大きく流し方向へ向けると解釈すべきものと考えられる.

また, McIntyre and Pfautsch (1982) は, インパクト時の左手の中手骨の位置が, 流し打ちの際にはバットヘッドより前方に, 引っ張りの際には後方へ位置していたと報告しており, 流し打ちをする際には, グリップをヘッドに先行して突き出し, バットヘッドが相対的に遅れて出るという傾向を示す結果となった. 森下・矢内(2018)は, 「流し打ちを行うにはグリップエンド側の手部でバットの水平回転を抑制するし, バットヘッドの進行方向に力を加える」必要があり, これは「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スイングすべきである」という指導と同義で考えられると述べている. また, 荒木ほか(2012)の研究は, 実戦での流し打ちにおいてインパクト直前のバットヘッド速度が速い選手と遅い選手の打撃動作について, 右打者を例にして以下のように述べている.

ヘッド速度上位群は下位群よりも, 右肩の屈曲角度が小さくしたままスイングを行っていた. これは右脇を締める動作であり, ヘッド速度を大きくするためには右脇を締める動作が有効であると示唆される. (荒木ほか, 2012, p.50)

田子ほか (2006) は、ティー打撃において内角、真ん中、外角のポイントで内角は引っ張り、真ん中はセンター返し、外角は流し打ちを指示した際、流し打ちでは、ボールインパクト時までに生じる肩や腰の打撃方向への角変位が小さかったと報告している。この結果は、右打者の場合、「いわゆる「体を開かない状態」にして、さらに、バットとボールが接触した時点では、左肩関節の外転を小さくしボールを引き付けた状態でインパクトしていた」ことを意味すると述べている。これら結果は、実用書において流し打ちをする際に、「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向ける」ことを実践するためには、「バット加速時に右脇（右打者）をしめ、グリップをヘッドに先行して突き出すことにより、バットをインからアウトの軌道でスイングすることが必要である」と述べられている概念と一致するものである。

3) 「ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること」に関する記述

実用書では流し打ちを『正しく』行うためには「ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること」が重要であると記述されているが、実際の打撃では打球方向に関わらずバットヘッドはインパクト時に下方に傾斜していることが多数の実測研究によって報告されている (Fleisig et al., 2002 ; Higuchi et al., 2013 ; King et al., 2012 ; 森下ほか, 2012)。このことは、実用書で推奨された「ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトする」という概念が物理的な位置関係を意味するものではなく、バットが下方へ傾斜するという通常のスイングを基準にした相対的な意味合いを有するものと解釈できる。すなわち、ヘッドをグリップに対して『過度に下げ過ぎない』ようにスイングするための忠言であると考えられる。実際に森下・矢内 (2018) が流し打ちの場合は引っ張りと比べてバットはより大きく下方に傾斜すると報告しているように、流し打ち時にヘッドが通常よりも大きく下方に傾斜する傾向がある。つまり「ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること」を意識的に実践させることによりヘッドを『過度に下げない』でスイングできるよう、予防策としての意味合いを有するものと考えられる。

実用書にバットの下方傾斜に関する記述が重要度をもって語られるのは、バットの下方傾斜が打球方向に大きな影響を及ぼすことに起因する可能性が示唆される。城所・矢内(2015)は、バットヘッドを下向きに傾斜させてボールの下側を打撃すれば、バットの打撃面を必ずしも流し打ち方向へ向けてインパクトすることなく流し打ちを実施することができることを報告している。さらに、バットヘッドを下向きに傾斜させてボールの上部を打撃すると、例えばバットの打撃面が流し打ち方向へ向いていたとしても、ゴロがよりセンター方向や引っ張り方向へ放たれる場合があることも報告している(城所・矢内, 2017a)。これら知見は実用書で推奨された『正しい』流し打ち技法の1要素である「ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトする」ことが流し打ちを行うための必要条件ではないことを意味する一方で、バットを大きく下方傾斜して流し打ちを試みると打球方向がバットの打撃面の向きによって規定できず、フライやライナーの場合はより大きく側方へ飛翔する流し打ちとなり、ゴロの場合はセンター方向寄りや引っ張り方向への打球となることを示すものである。

McIntyre & Pfautsch (1982) は、右打者は流し打ちの方が引っ張りに比べ、インパクトまでのバットを加速する間で、左肘関節を伸展する度合いが小さいことを明らかにした。一方、田子ほか(2006)は、ティー打撃による外角球の流し打ちでは、左肘関節の伸展動作が大きかったと、逆の結果を報告している。この結果は、ティー打撃では、内角球は肘をたたんでインパクトするのに対して、外角のティー台に置かれたボールを打撃するには、肘を伸ばしてインパクトする必要があるためであると考えられる。このように、実用書において「加速時に左脇(右打者)をしめる」必要があるという概念は、研究データと一致するものではなかった。

実用書と学術論文で記された流し打ちの成功に求められる共通点および相違点

以上の先行研究の結果をまとめると、実用書では、[1]捕手寄りの位置でボールをインパクトすること、[2]インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること、[3]へ

ットをグリップより下げないでスイング・インパクトすることが流し打ちを『正しく』行うため重要な要素であると共に述べていることが確認された。一方、学術論文では、実測研究やシミュレーションによって上記[1]は概ね支持されているが、[2]と[3]についてはこれに従わなくても流し打ちは可能であることが示された。すなわち、バットの打撃面を流し打ち方向へ向けなくとも、バットヘッドをグリップエンドよりも低くしてボールの下部を打撃すれば流し打ちが可能であることが示された。ここで、図 1-4 (a) にバットの打撃面を流し打ち方向に向けた流し打ち、図 1-4 (b) にバットヘッドをグリップエンドよりも低くして打撃した流し打ちの時系列でのスイング動作をイラストで示す。人間がある動作を行う際に、完全に同じ動作を繰り返すことは不可能であるが、誤差が少なくなるように努力することはできる。上記の 2 種類のうち、どちらが打ち損じる確率を低く打撃できるかを検討できれば指導現場において、より科学的根拠に基づいた効果的な指導を行うことができると考えられる。

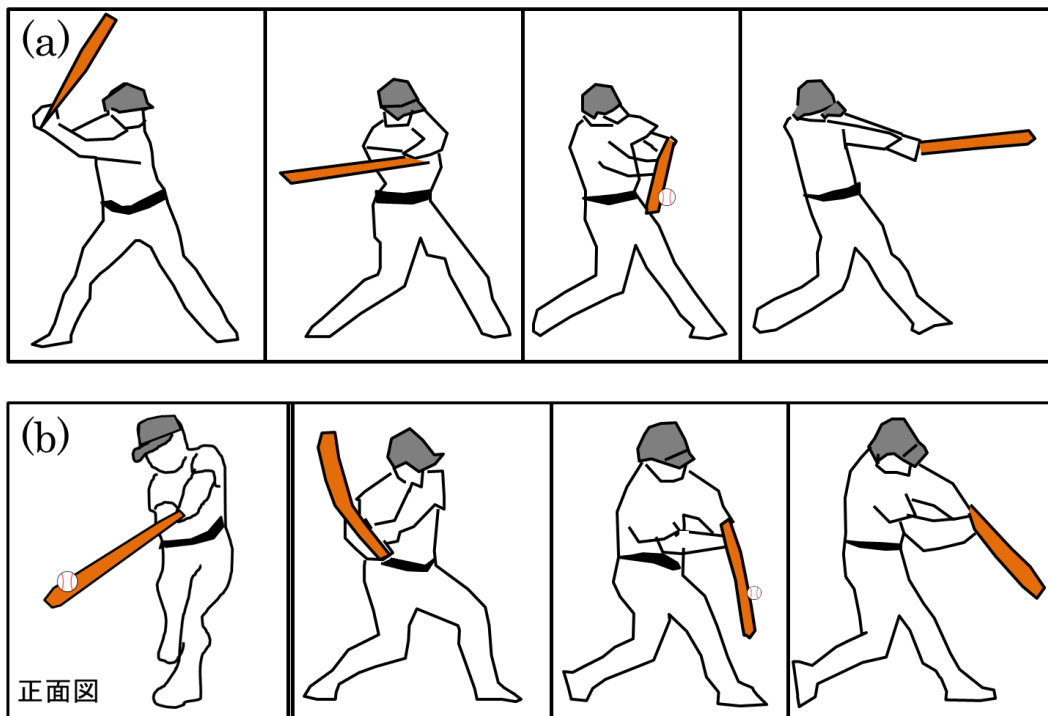


図 1-4 2種類の流し打ち（バットの打撃面を流し打ち方向に向けた流し打ち (a) および、バットヘッドをグリップエンドよりも低くして打撃した流し打ち (b)) の時系列でのスイング動作

2.3. 打球方向別のスイングの特徴

これまでにまとめてきた研究は、主にインパクト現象について記述した物理学的分析と流し打ち技法に関してまとめた研究が中心であった。しかし、流し打ち方向、センター返し、引っ張り方向といった放たれた打球方向に応じて打者のスイングはどのように変化しているのかを議論するためには、打球方向別の比較分析が必要となる。以下に、打球方向別のスイングの特徴として、ヘッド速度およびスイング軌道に関する研究についてまとめる。

バットの運動は、グリップエンドの並進運動とスイングの回転速度によって表すことができる。バットヘッドの移動速度に関して、インパクト直前のバット先端の速度を以下「ヘッド速度」と表す。村田 (1998) は、「ヘッド速度が速いバッターほど、バッティングのための認知情報処理に多くの時間を費やして、ボールを長いボールを長い時間見ることができる」と述べている。また、インパクト後の打球速度は、スイング速度（ヘッド速度と同等の意味を表す）に比例する (Crisco et al., 2002 ; Sawicki et al., 2003) とも言われている。城所・矢内 (2017a) によると、フリー打撃における引っ張り、センター返し、流し打ち方向へ打球を放った際のバットのヘッド速度は、引っ張りおよびセンター返しのヘッド速度が流し打ちと比較して有意に大きいと報告されており、この結果は、光川ほか (2018) のティー打撃における結果とも一致している。田子ほか (2006) は、ティー打撃で引っ張り、センター返し、流し打ち方向へ打ち分けを行った結果、流し打ちではスイング開始以降インパクトまでの時間が短かったと報告している。McIntyre and Pfautsch (1982) も同様に、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かったと報告している。田子ほか (2006) の研究では、流し打ちの際、捕手寄りにティーを置いたため、バットのヘッドを回す時間が省けたと述べられているが、ヘッド速度は、通常スイング開始からインパクトの瞬間まで増大し続ける特徴がある (Tabuchi et al., 2007) ため、捕手寄りの位置でボールをインパクトした流し打ちでは加速時間が短縮するためにヘッド速度が小さくなったものと考えられる。つまり、加速度が同じであればスイング時

間が増大するほどインパクト時ヘッド速度は大きくなることから、より体の前方でインパクトする引っ張り方向への打球のほうがヘッド速度が大きくなるため打球速度も大きくなると言える。

打者によって打撃フォームは様々であり無数のスイングフォームがあると思われるが、それら多様なスイングフォームの結果として表れるバットスイングの軌跡に着目すると、野球における基本的な軌跡は大きく分けて 3 つの局面に分けて考えることができる。一連のスイングにおける、打者のインパクト直前のヘッド速度のベクトルの向きを「スイング軌道」と定義し、この 3 局面でのスイング軌道に関して、インパクト直前にバットヘッドの速度ベクトルを下方に傾けたスイング、水平となるスイング、上方に傾けたスイングをそれぞれダウンスイング (chop)、レベルスイング、アッパースイング (upper cut) と呼ぶ (図 1-5)。図 1-5 に、ダウンスイング (chop) とアッパースイング (upper cut) のバットスイング軌道を示す。時間的制限のある野球の打撃では、ダウンスイングはバットの軌道がよりコンパクトになるという理由から、多くの打者が採用してきた (川村ほか, 2001)。しかし、森下ほか (2012) は、速い打球を放つには、インパクト直前で投球されたボールとバットの軌道が横から見て平行になるようなスイング角度、いわゆるアッパースイングでインパクトすることが重要であると述べている。さらに、テッド ウィリアムズも (テッド ウィリアムズ, 2000, pp.50-51), アッパースイングこそ理想的打法であると述べている。その理由として、「投手がボールを投げると、投球は約 5 度下向きになる。これを打つだけだから、少しアッパースイングにした方が、投球の軌道とバットの軌道が一致している区域が長くなる。そのため、少し上向きに打ったほうが、投球の軌道とマッチしてしっかり打てるインパクトゾーンの範囲が広がる。」と説明している。また、パワーヒッターかアベレージヒッターかといった打者のタイプによってもスイング軌道の特徴は異なると思われる。さらに、投球されたボールの球種やコースによってもスイングは変化することから、次に打球方向別のスイング軌道についてまとめる。

実際の試合において長打が放たれた際のインパクト直前のスイング軌道を分析した森下

ほか (2012) は、引っ張りでは約 5° 上方に、センター返しでは約 3° 上方に、流し打ちでは約 3° 下方にスイング軌道が傾いていたと報告している。光川ほか (2018) も、流し打ちのほうが引っ張りよりもインパクト直前のスイング軌道が下方へ向く程度が有意に大きい、つまりスイング軌道が下方へ傾くことを、ティー打撃を用いた実験結果として報告している。さらに、森下・矢内 (2018) も、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、「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」と報告している。これらの結果は、傾いた面上を移動するバットヘッドの軌道が降下、水平、上昇の順に時系列で推移することから、この軌道上でのボールインパクトの位置によってインパクト時のスイング軌道が異なったことを示すものと考えられる。つまり、軌道上の前半部でボールをインパクトする流し打ちはダウンスイング、後半でインパクトする引っ張りはアップスイングとなり、流し打ちから引っ張り方向へ打撃するにつれてバットの軌道は下向きから上向きに変化したものと考えられる。

打球方向を決定する要因は、スイング条件に加えて、どのような向きでバットとボールがインパクトしたかというインパクト条件にも大きく左右される。放たれた打球の左右方向の角度は、インパクトの瞬間のバットの水平面・鉛直面上の方位およびボールとバットの短軸上のインパクト位置によって決定されるが、ある方向に打球を放つためのバットの向きやインパクト条件は一通りではなく、インパクト時のバットの方位（水平面への投影角と鉛直面への投影角）とバット短軸上のインパクト位置の組み合わせにより、無数の可能性が考えられる。例えば、右打者によって流し打ち方向へ放たれた打球には、ゴロで一・二塁間を抜く打球や、二塁走者がタッチアップできるような右翼方向へのフライ、右中間への飛距離の大きな打球など様々なパターンがある。このように状況に応じて勝利に繋げるための打球の飛距離や打球角度は様々である。また、同一選手でも投球されたボールのコースや球種によってスイングは変化することに加え、投手にタイミングを外された場合にはスイング開始後に修正し対応する必要があるため、様々な場面にお

いて狙った方向へ流し打ちを行うことのできるインパクト条件の多様性を明らかにしておくことは有意義と考えられる。

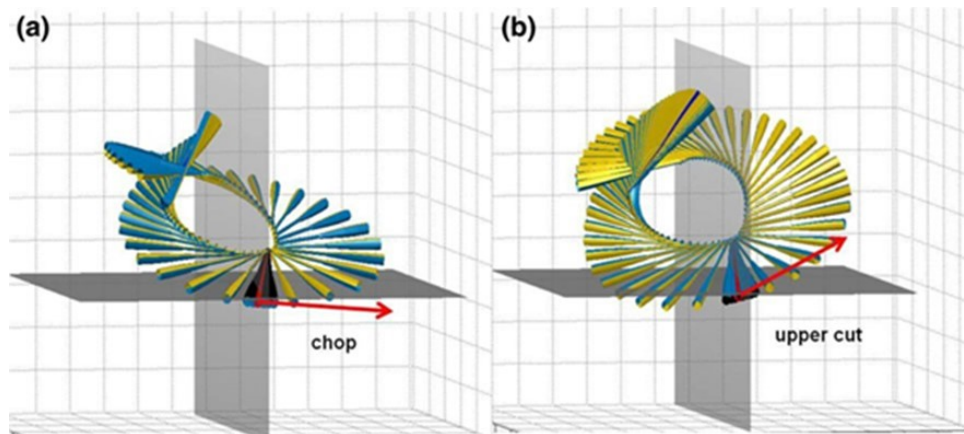


図 1-5 ダウンスイング (chop) とアッパースイング (upper cut) のバットスイング軌道. King et al. (2012) A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. Sports Engineering. から引用

2.4 本研究との関連

これまでの研究では、バットとボールのインパクトに関して、実測打撃による研究や 2 次元剛体モデルによるシミュレーション研究によって行われてきた。近年では、より精度の高い分析を行うために弾性体モデルを用いた 3 次元インパクトシミュレーション分析が行われるようになった。弾性体モデルを用いて実際の打撃実験を基に分析を行った宮澤ら (2011) の研究では、バットの向きが一定のセンター返しを想定した分析に限定されていたが、実際の打撃においては、試合状況に応じてバットの向きを変化させ、打球を左右方向に打ち分けている。本研究で着目した流し打ちの分析を行うためには、バットの上下・前後の向きも考慮した 3 次元シミュレーションモデルで分析を行う必要がある。その際、実測に基づいたシミュレーションモデルを作成し、実際の打撃に近い設定にすることで系統的かつ定量的に、より現実的な分析が可能となることから、選手の打撃技術の向上に役立つと考えられる。

第2章 『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：野球のインパクトシミュレーション

1. 緒言

流し打ちにおける打球の飛翔方向は、水平面上で生じる 2 次元的な衝突現象として、第 1 メカニズムで説明できる (McIntyre and Pfautsch, 1982). さらに、このメカニズムに加え、近年の研究 (城所・矢内 2015) によって、流し打ちの実施にはバットの打撃面を必ずしも流し打ち方向へ向けてインパクトする必要はなく、①バットヘッドがグリップエンドよりも低くなるように傾いたバットの上面で、②ボールの下部を打撃することによるバットの横断面上での斜衝撃 (第 2 メカニズム) によってもそれが可能になることが示された。つまり、打球の左右方向への角度は、インパクトの瞬間のバットの水平面上の方位だけではなく、鉛直面上の方位やインパクト位置のバット短軸成分の影響も受けて決定される。したがって、インパクトの瞬間において水平面上に投影したバットの向きが同じであっても、バットが鉛直面上で傾いている場合はボールとバットの短軸上のインパクト位置によって左右への打球方向は異なることになる。以上より、ある方向へ (例えば右打者が右翼方向へ) 打球を打ち出すためのバットの向きやインパクト条件は一通りではなく、インパクト時のバットの方位 (水平面への投影角と鉛直面への投影角) とバット短軸上のインパクト位置の組み合わせにより、様々な条件に及ぶものと考えられる。さらに、同方向に打球を打ち出すことのできる様々な条件の中で、打球速度が最大となる条件が存在すると考えられる。これを詳細に分析することにより、打球方向に応じて理想的なバットの姿勢とボールの当て方を定量化することが可能となる。このような分析を定量的に行う場合、バットの向きとインパクト位置の影響のみに着目する必要があるため、それ以外のインパクト条件 (投球角度、スイング角度、スイング速度等) を一定にして分析する必要がある。しかし、実測による打撃実験では、試技ごとにバットスイングの速度や角度等が異なるため、バットの向きやインパクト位置のみの影響を個別に抽出することは困難である。また、各選手のパフォーマンスは偶然性の影響を受けて試技間で変動することから、打撃

実験による実測データのみ頼った方法論で最適化について検証するには限界がある。

実測データに基づいた分析における限界を克服する方法論の一つとして、有限要素法を用いたシミュレーション分析がある。流し打ちの分析をするには、打球の左右方向の角度に加え、インパクト時のバットの向きを考慮した 3 次元空間でのシミュレーションを行うことが必要不可欠である。そこで、本章では、打球方向に応じた理想的なバットの姿勢とボールの当て方を定量化するために、①弾性体モデルを用いた 3 次元空間でのシミュレーションを実施する 3 次元インパクトシミュレーション分析の方法論を確立し、打撃実験により実測された流し打ちの 3 次元分析結果を用いて妥当性検証すること、および、②指定された方向（流し打ち方向）にライナーやフライを打ち出すことが可能なバットの水平面・鉛直面上の方位とバットの短軸上の衝撃位置の組み合わせを特定し、打球速度を最大にするインパクト条件を明らかにすることとした。

2. 方法

2.1 シミュレーションモデルの設定

右打者を想定した打撃におけるボールとバットの挙動を分析するため、有限要素法を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションモデルの構築と計算には Abaqus Student Edition 6.8 (Dassault Systemes Simulia Corp., USA) を用いた (図 2-1)。本研究では、宮澤ほか (2011) のインパクトの瞬間におけるシミュレーションモデルを参考に、木製バット (0.84m, 0.907kg) と硬式野球ボール (半径 0.036m, 質量 0.148kg) を実物の形状と物性値にあわせて構築した (志村ほか, 2012)。その方法を以下に記す。

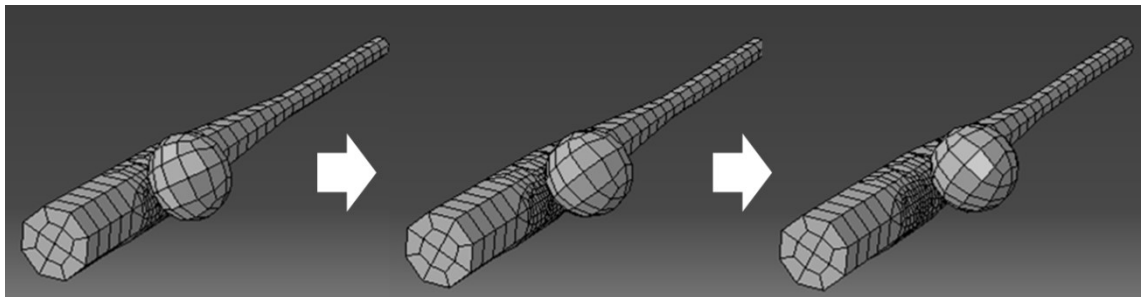


図 2-1 Abaqus Student Edition6.8 (Explicit) により作成された
シミュレーションモデル

2.1.1 木製バットのモデル化

木製バットのモデルは、バットを線形弾性体とみなし作成した。バットの打撃面の曲面を小さな平面の集合として近似し、3次元シェル要素を用いてモデル化した。原点をバットのグリップエンドとし、3軸 x' , y' , z' を有する座標系を図 2-2、また、バットの形状を図 2-3 に示した。本研究では、木製バットの振動実験を行い、得られたバットの共振周波数、振動モードおよび振動の節の位置について実測データ、および、その振動実験のシミュレーションによって得られたシミュレーション値を比較した。その上で、算出された結果を反復法を用いて最適化し、より正確に木製バットの物理特性を反映させたバットモ

デルを構築した。図 2-3 のようにシミュレーションモデルのバットの形状は、END、MID、TOP の 3 つのパーツに分割した。また、表 2-1 に示すように、ヤング率 E を $[6.58, 6.51, 6.48] \times 10^4$ MPa に、肉厚 t を $[0.6, 1.0, 1.4]$ mm に設定し、これらの値から、曲げ剛性 $E \cdot I'_{y'}$ の値 $[3.1, 22.5, 84.9] \times 10^8$ MPa \cdot mm⁴ を算出した。

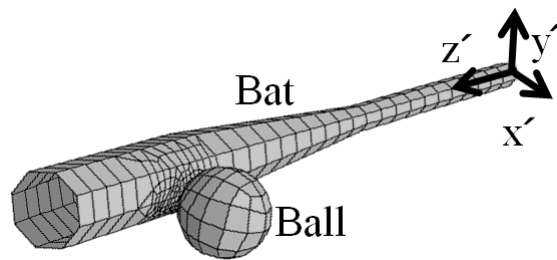


図 2-2 ボールとバットの有限要素モデルおよびバット座標系 $R_{x'y'z'}$ の定義。宮澤ほか (2011) 野球のバッティングにおけるインパクトシミュレーション. から引用

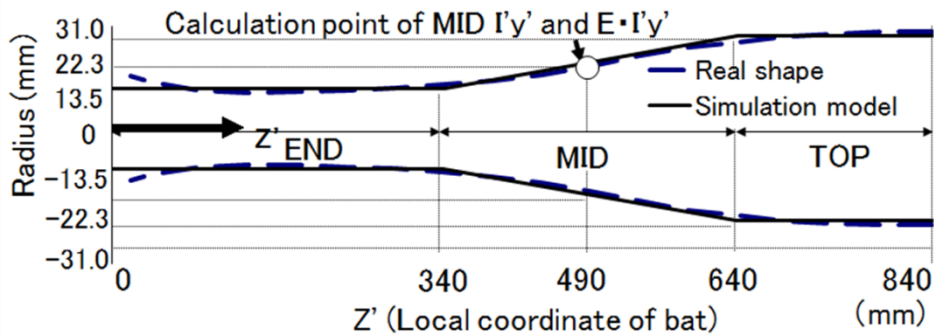


図 2-3 バットの実物の形状とシミュレーションモデル。志村ほか (2012) スイング角度およびローリング角速度が打球特性に及ぼす影響 (野球のインパクトシミュレーション). から引用

表 2-1 バットの 3次元シェルモデル. 志村ほか (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). から引用

	END	MID	TOP
Young's Modulus : $E \times 10^4$ (MPa)	6.58	6.51	6.48
Thickness : t (mm)	0.6	1.0	1.4
Poisson's Ratio : ν	0.35	0.35	0.35
Density : $\rho \times 10^6$ (kg/mm ³)	8.16	8.16	8.16
Diameter : ϕ (mm)	27.0	44.5	62.0
Area moment of inertia : $I_y' \times 10^3$ (mm ⁴)	4.6	34.6	131.0
Flexural rigidity : $E \cdot I_y' \times 10^8$ (MPa \cdot mm ⁴)	3.1	22.5	84.9
Mass : (kg)	0.913		
Center of gravity : z' (mm)	573		
Moment of inertia : I_x', I_y', I_z' (kg \cdot mm ²)	$(I_x', I_y', I_z') = (340, 340, 0.63) \times 10^3$		

2.1.2 硬式ボールのモデル化

表 2-2 に硬式ボールの形状および物性値を示した. 硬式ボールのモデルはソリッド要素を用いて線形弾性体とみなし作成した. ボールの物性に関して, 直径および密度は実測値を用い, ボールのヤング率およびポアソン比は, 尾田ほか (2004) の値を採用した.

表 2-2 ボールの 3次元ソリッドモデル. 志村ほか (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). から引用

Young's Modulus : E (MPa)	18
Diameter : ϕ (mm)	72
Poisson's Ratio : ν	0.4
Density : $\rho \times 10^7$ (kg/mm ³)	7.4
Rayleigh damping : $\beta \times 10^{-4}$	1.5

2.1.3 接触条件

バットとボールの接触解析は Penalty 法を用いた。硬式ボールと木製バットの摩擦係数 μ は、先行研究 (Sawicki et al., 2003) の数値を参考に、 $\mu = 0.5$ と設定した。本研究で用いた Abaqus Student Edition6.8 (Explicit) では、制限された要素数でモデルを作成したため、ボールとバットの表面を構成するメッシュが粗くなった。この影響によって、接触面の節点の凹凸が打球速度に 0.1m/s 程度のばらつきを生じさせることが確認された。この影響を解消するため、インパクト直前のバットとボールの接触面をずらし、ボールとバットそれぞれのメッシュで定義される一平面ずつが接触することによってインパクトが開始されるように調節した (図 2-2, 4)。また、インパクト位置の違いによって、バットモデルのメッシュの切り方を変更したが、メッシュの切り方をインパクト位置に合わせて変更させた場合と、そうでない場合とで比較したところ、これが打球速度に対して及ぼす影響は 0.2~0.3 m/s であった。

静止座標系 R_{xyz} を以下のように定義した (図 2-5)。ホームベースの後端を原点とし、水平面上の投手方向に向かうベクトルを y 軸、鉛直上向きに向かうベクトルを z 軸、y 軸と z 軸との外積を x 軸とした。

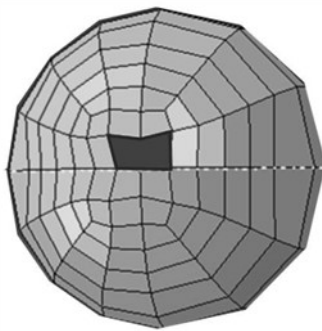


図 2-4 ボールモデルの接触面. 志村ほか (2012) スイング角度およびローリング角速度が打球特性に及ぼす影響 (野球のインパクトシミュレーション). から引用

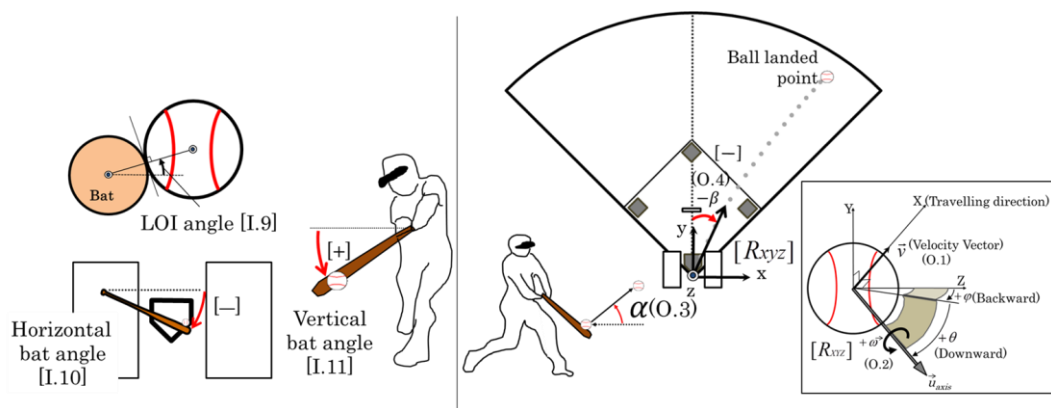


図 2-5 静止座標系 R_{xyz} ・ボール軸座標系 R_{XYZ} の定義,

およびシミュレーションの入力・出力変数

2.2 シミュレーションの入力変数

インパクト直前のバットとボールの運動を表す入力変数として、次の 11 個のパラメータを設定した。その内、投球されたボールの運動を設定する変数を、ボール速度の大きさ I.1 [m/s]、ボールの角速度の大きさ I.2 [rps]、投球角度 I.3 [°] (水平面に対する投球されたボールの角度) とした。スイングを設定する変数については、ヘッド速度の大きさ I.4 [m/s]、スイング角度 I.5 [°] (水平面に対するヘッド速度の方向)、ローリング角速度 I.6 [°/s] (バットの長軸回りの角速度)、スイング角速度 I.7 [°/s] (バットの長軸そのものが回転する速度) とした。ボールとバットのインパクト条件を設定する変数については、ボールのインパクト位置 I.8 [mm] (グリップエンドからの距離)、衝撃線角度 I.9 [°] (衝撃線と水平面がなす角度)、及びバット水平角 I.10 [°]、バット鉛直角 I.11 [°] を設定した (図 2-5, 表 2-3)。衝撃線角度は、ボール中心がバットの横断面の中心よりも上に位置する場合を正として表した。また、バット水平角はインパクト時に水平面上に投影したバットと地面に水平な x 軸とのなす角度 (バットの打撃面がレフト側を向いたインパクトを正とした)、バット鉛直角は、インパクト時のバットヘッドの鉛直面上における下向き傾斜角度 (バットヘッドが鉛直面上で下方に向く方向を正とした) とした (図 2-5)。

表 2-3 シミュレーションの入力変数

Input parameter	Input Values
The motion of the pitched ball	I.1 The velocity of the pitched ball immediately before impact 27.8 [m/s]
	I.2 The angular velocity of the pitched ball 30.0 [rps]
	I.3 The vertical angle of the pitched ball immediately before impact 5.0 [°]
Swing motion	I.4 The velocity of the bat head immediately before impact 32.7 [m/s]
	I.5 The vertical direction of the bat swing immediately before impact 4.0 [°]
	I.6 Rolling angular velocity (the angular velocity of the bat around its long axis) 1000 [°/s]
	I.7 Swing angular velocity (the angular velocity of the bat's long axis) 2500 [°/s]
The impact between ball and bat	I.8 Position of ball impact (the site of ball impact) 692 [mm]
	I.9 LOI angle (the under-cut distance determined as the vertical inclination angle of the line of impact) [°]
	I.10 Horizontal bat angle [°]
	I.11 Vertical bat angle [°]

2.3 シミュレーション分析の実施

一定の条件で投げられた投球に対し、インパクト時のバットの位置と角度のみを変更することによって放つことのできる打球方向、打球角度、速度および角速度を算出するため、実測値の平均値で構成される 5 項目と系統的に変動させた 3 項目（バット水平角 (I.10)、バット鉛直角 (I.11)、衝撃線角度 (I.9))の組み合わせを設定した。具体的には、ボールインパクト時のバット水平角とバット鉛直角は城所・矢内 (2015)による流し打ちの実測実験（水平角 = $-27.6\sim 15.0^\circ$ 、鉛直角 = $8.5\sim 42.7^\circ$ ）で得られたデータを約 10° 上回る範囲（水平角 = $-31\sim 20^\circ$ 、鉛直角 = $0\sim 51^\circ$ ）とし、各々 3° ずつ変化させた。さらに、各々のバット方位について衝撃線角度を $5\sim 30^\circ$ の範囲内で 5° ずつ変化するようにバット位置を平行移動させた。以上の組み合わせ、計 1944 通り (= $18\times 18\times 6$) についてシミュレーション分析を行い、打球の初速度と角速度を求めた。それ以外の入力条件 (I.1~I.7) は同実験で得られた値の平均値を用いた。ボールの衝撃位置に関して、短軸方向の衝撃線角度は変数としたが、長軸方向のボールのインパクト位置 (I.8) は、全ての分析においてバットの『芯』 (692mm) で統一した。分析に用いたシミュレーションの入力値を表 2-3 に示す。

設定したシミュレーションモデルの妥当性を検証するため、城所・矢内 (2015) の研究において収集した大学野球選手 16 名が行ったマシン打撃による流し打ち試技（打球の飛

距離が 40m 以上で流し打ち方向に打ち出された 146 試技) の内, バットの芯付近 [604 \leq I.8 \leq 730] でボールをインパクトし, かつ衝撃線角度が 30°以下であった 116 試技を分析対象とし, これらの試技のインパクト直前の実測値を入力値 (I.1~I.11) としてシミュレーションを行い, 出力したインパクト後の打球の挙動を実測値と比較した.

2.4 シミュレーションの出力変数

シミュレーションの出力値を図 2-5 に示す. 打球速度の大きさ O.1 (v)[m/s], 打球の角速度 O.2 (ω)[rps], 打球角度 O.3 (α)[°] に加え, 流し打ちの打球方向を表す打球方向 O.4 ($-\beta$)[°] はセンターラインを 0°として右翼方向を負と定義した (表 2-4). 本研究では, バット水平角とバット鉛直角は城所・矢内 (2015) による流し打ちの実測実験で得られたデータを約 10°上回る範囲 (つまり, 実測で測定できた範囲より大きめ) に設定した. そのため, 衝撃線角度との組み合わせによっては, 一塁線ファールゾーン, さらにはバックネット後方に飛ぶようなファールとなるような打球も全シミュレーション結果の中には存在した. しかし, 野球の試合において in play になる打球の大半がフェアゾーンに打ち出された打球であるため, インパクト直後の打球速度ベクトルから算出した打球方向 (O.4) が-45~0°の範囲内となった試技のみを本研究における分析対象とした. 分析対象とした出力値の内, バット水平角とバット鉛直角の各組み合わせについて記録された最大打球速度及びその最大打球速度が記録された際の打球角度と打球方向を結果として提示した.

表 2-4 シミュレーションの出力変数

Output parameter		
O.1	: The velocity of the batted ball immediately after impact	[m/s]
O.2	: The angular velocity of the ball after impact	[rps]
O.3	: The vertical angle of the batted ball velocity immediately after impact	[deg]
O.4	: The horizontal angle of the batted ball velocity immediately after impact	[deg]

3. 結果と考察

3.1 シミュレーションモデルの妥当性

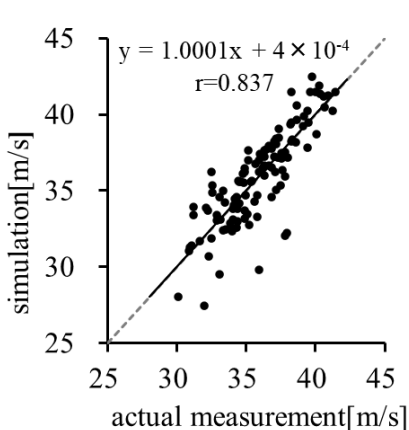
実測値とシミュレーション値の間には、打球速度の大きさ、打球の角速度の大きさ、打球角度、および打球方向のすべてにおいて、1%水準で有意な相関関係（打球速度の大きさ $r = 0.837$ 、打球の角速度 $r = 0.748$ 、打球角度 $r = 0.919$ 、打球方向 $r = 0.865$ ）が認められた。一方、打球速度の大きさ、打球角度、および打球方向において、シミュレーション値が実測値に対して有意に低い値（打球速度の大きさ：誤差 1.3 ± 1.4 m/s、打球角度：誤差 $8.2 \pm 4.1^\circ$ 、打球方向：誤差 $-4.5 \pm 4.2^\circ$ ）、打球の角速度において、シミュレーション値が実測値に対して有意に高い値（誤差 -7.7 ± 10.7 rps）が認められた（表 2-5）。

表 2-5 シミュレーションの出力値の精度

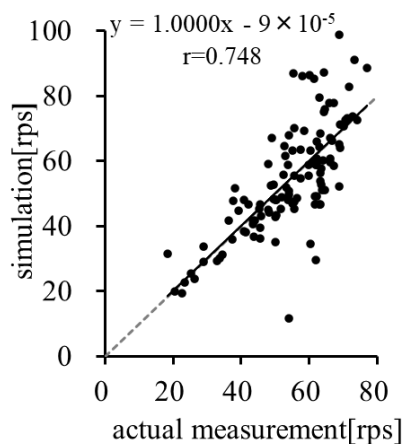
Output parameters	(a) Measured values			(b) Simulation outputs			Error [(a)-(b)]		
	Mean	\pm	SD	Mean	\pm	SD	Mean	\pm	SD
O.1 [m/s]	35.9	\pm	2.6	34.6	\pm	2.1	1.3	\pm	1.4
O.2 [rps]	54.1	\pm	12.8	62.0	\pm	16.2	-7.7	\pm	10.7
O.3 [deg]	25.2	\pm	10.1	16.9	\pm	8.4	8.2	\pm	4.1
O.4 [deg]	-22.9	\pm	8.4	-18.3	\pm	6.6	-4.5	\pm	4.2

実測値とシミュレーション値で乖離が生じる要因の一つとして、バットとボールの摩擦係数、ボールのヤング率等の機械的特性が非線形特性を有することが考えられる。シミュレーションではこれら機械的特性を一定値に設定している一方で、実際のバッティングでは、バットとボールの接触位置やスイング速度等のバッティング条件が異なると、ボールがバットから受ける垂直抗力とボールに生じるひずみが増加する。これに伴い摩擦係数とヤング率も変化することでシミュレーションの出力値との乖離が生じると考えられる。また、出力値の中でも、特に打球角度は複数の機械的特性の影響を大きく受けやすいため、より誤差が生じやすと考えられる。シミュレーションモデル上で打球角度を算出する際、衝撃線角度に対して平行な方向と垂直方向速度の 2 つの成分のなす角度から決定されるが、水平方向の速度成分はヤング率、垂直方向の速度成分は摩擦と 2 つの機械特性が共

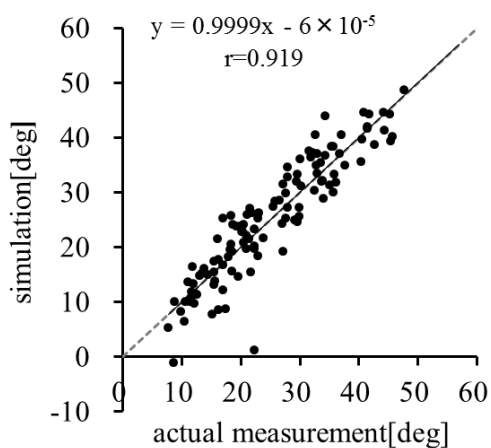
に大きく影響するため誤差が生じやすいと考えられる。なお、本研究で用いたシミュレーションモデルにおいて、実測との誤差が生じるが、高い相関関係が得られたことからバッティング条件により変化する出力値を相対的には評価することは可能であり本研究の目的に沿った検討を実施できると考えられる。本研究の着目点である打球速度と打球方向について観察された誤差は実質的には大きなものではないが、分析精度を高めるために、一次回帰式を用いて補正した(図 2-6)。実際のシミュレーション値を実測値で回帰した一次回帰式は、打球速度の大きさ $y = 0.6721x + 10.432$ 、打球の角速度 $y = 0.9522x + 10.437$ 、打球角度 $y = 0.7628x - 2.334$ 、打球方向 $y = 0.6813x - 2.7151$ であった。実測とシミュレーション結果を近づけるため、シミュレーションモデル作成の際に、物性値の変更も試みた。しかし、ヤング率や摩擦係数などの複数の物性に関する変数が複合的に上記の 4 つの出力値に影響を及ぼすことから、最適解を見つけ出すことが困難であったため、本研究では、このような回帰式による補正という手段を選択した。その結果、図 2-6 の回帰直線(打球速度の大きさ $y = 1.0001x + 4 \times 10^{-4}$ 、打球の角速度 $y = 1.0000x - 9 \times 10^{-5}$ 、打球角度 $y = 0.9999x - 6 \times 10^{-5}$ 、打球方向 $y = 0.9999x - 5 \times 10^{-5}$)の傾きがほぼ 1.0 となったことから、この回帰式は主に y 切片を補正(シミュレーション値と実測値の両平均値間の誤差の補正)したものと解釈できる。本研究で用いた 3 次元シミュレーションモデルの出力値を回帰式で補正することにより、十分な精度で実測値を推定できることが確認された。以下の結果には、回帰式により補正した値を示す。



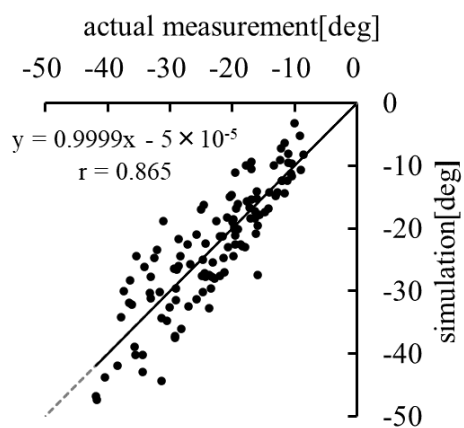
(a) Velocity of the batted ball



(b) Angular velocity of the batted ball



(c) Vertical angle of the batted ball



(d) Horizontal angle of the batted ball

trajectory

trajectory

図 2-6 シミュレーション出力 (回帰後) と実測値 (真値) の関係

3.2 ボールインパクト時のバット水平・鉛直角と獲得可能な最大打球速度

バット水平角・鉛直角の各組み合わせについて算出された最大打球速度 (図 2-7 (a))とこれが獲得された際の衝撃線角度 (図 2-7 (b)) を、打球方向別 (中堅方向 [-15° 以上 0° 以下], 右中間方向 [-30° 以上 -15° 以下], 右翼方向 [-45° 以上 -30° 以下]) に示す。打球速度は、メッシュの切り方による算出誤差 ($0.2\sim 0.3$ m/s) を上回る interval (0.5 m/s 単位) で示した。各組み合わせについて算出された最大打球速度の中の最高値は、中堅方向 ($-15\sim 0^{\circ}$) , 右中間方向 ($-30\sim -15^{\circ}$) で 40.0 m/s , 右翼方向 ($-45\sim -30^{\circ}$) で 39.5 m/s であった。また、これら最高値は単一の組み合わせだけではなく、複数の組み合わせにおいて記録された。 39.5 m/s 以上の値は、打球が中堅方向 ($-15\sim 0^{\circ}$) に打ち出された際にはバット水平角が $-10\sim -1^{\circ}$ の条件で、右中間方向 ($-30\sim -15^{\circ}$) に打ち出された際には $-19\sim -7^{\circ}$ の条件で、右翼方向 ($-45\sim -30^{\circ}$) に打ち出された際には $-25\sim -13^{\circ}$ の条件で記録されており、いずれの場合もバットの打撃面をライト方向 ($I.10<0$) に向けた打撃であった。また、これらの 39.5 m/s 以上の値が獲得された際の衝撃線角度は分析範囲内で小さい値 ($5\sim 10^{\circ}$) であった。この範囲内 ($v\geq 39.5$ m/s) におけるバット水平角と打球方向の関係を図 2-8 に示す。以上の結果から、最高打球速度は衝撃線角度が $5\sim 10^{\circ}$ という、横断面上においてはほぼ正面衝突もしくは、ボールのわずかに下部をインパクトした条件で、バット水平角の 1.6 ± 1.1 倍右翼線寄りの方向へ打球が打ち出された際に獲得できることが明らかになった。

Horizontal angle of the batted ball trajectory: 0-15[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								40.0	39.5											
	3								40.0	39.5	31.5										
	6								40.0	40.0	36.5										
	9								39.5	40.0	38.5	31.5									
	12								40.0	39.5	39.0	34.5									
	15								39.5	39.5	39.0	36.5	31.5								
	18								40.0	39.5	39.5	38.5	34.5								
	21								40.0	39.5	39.5	38.0	34.5	31.5							
	24								40.0	40.0	39.5	38.0	36.5	31.5							
	27								40.0	39.5	39.5	38.0	36.5	34.5	31.5						
	30								39.5	39.5	39.5	39.0	38.0	34.5	31.5						
	33								40.0	39.5	40.0	39.0	38.0	36.5	34.5	31.5					
36								39.5	39.5	40.0	39.0	38.0	36.5	34.5	31.5	31.5					
39								39.5	40.0	39.0	38.0	36.5	36.5	34.5	31.5						
42								39.5	39.5	39.5	38.0	36.0	36.5	34.5	31.5	31.5					
45								39.5	39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	36.5	34.5	31.5					
48								39.5	39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	36.5	34.0	31.0	31.5				
51								40.0	40.0	40.0	39.0	38.0	36.5	36.5	34.0	34.5	31.5				
Horizontal angle of the batted ball trajectory: 15-30[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								39.5	39.5	40.0										
	3								39.0	39.0	40.0										
	6								39.0	39.0	39.5	34.5									
	9								39.0	39.5	36.5										
	12								39.5	40.0	36.5	31.5									
	15								39.0	40.0	38.0	34.0									
	18								39.5	39.5	38.5	36.5	31.5								
	21								39.0	39.5	39.0	36.5	34.0	31.5							
	24								39.5	39.0	39.5	38.0	34.5	31.5							
	27								39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	34.5	31.5						
	30								39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	34.0	31.5						
	33								39.5	39.0	38.0	36.5	34.0	31.5	31.5						
36								39.5	39.0	38.0	38.0	36.5	34.0	31.5							
39								39.0	40.0	39.5	38.0	36.5	34.0	31.5	31.5						
42								39.0	39.5	39.5	38.0	36.5	34.0	34.0	31.5						
45								39.0	39.0	39.0	38.0	36.5	36.5	34.0	31.5	31.5					
48								39.5	39.0	39.5	38.0	36.5	34.0	31.5	31.5						
51								39.0	39.5	38.0	38.0	36.5	34.0	34.0	31.5	31.0					
Horizontal angle of the batted ball trajectory: 30-45[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								39.5	39.5	31.5										
	3								39.0	39.0	36.5										
	6								39.0	39.0	39.0	31.5									
	9								39.0	39.0	39.0	34.5									
	12								39.0	39.0	39.0	36.5	31.5								
	15								39.0	39.0	39.0	36.5	31.5								
	18								39.0	39.0	39.0	38.0	34.5	31.5							
	21								39.0	39.5	38.0	36.5	31.5								
	24								39.0	39.0	38.0	36.5	34.0	31.5							
	27								39.0	39.0	38.0	36.5	34.0	31.5							
	30								39.5	39.5	39.5	38.5	34.0	34.0	31.5						
	33								39.5	39.5	39.5	38.0	36.5	34.0	31.5						
36								39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	34.0	31.5	31.5						
39								39.5	39.5	39.0	38.0	36.5	34.0	34.0	31.0						
42								39.5	39.5	39.5	38.0	36.5	36.5	34.0	31.0	31.0					
45								39.5	39.5	39.5	38.0	38.5	36.5	34.0	31.0	31.5					
48								39.5	39.5	39.5	38.0	38.0	36.5	34.0	34.0	31.0	31.0				
51								39.5	39.5	39.5	38.0	36.0	36.0	34.0	31.0	31.0					

(a) Maximum velocity of the batted ball

Horizontal angle of the batted ball trajectory: 0-15[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								5	5											
	3								5	5	30										
	6								5	5	20										
	9								5	5	15	30									
	12								5	5	10	25	30								
	15								5	5	10	20	30								
	18								5	5	5	15	25	30							
	21								5	5	5	15	25	30							
	24								5	5	5	15	20	30							
	27								5	5	5	15	20	25	30						
	30								5	5	5	10	15	25	30	30					
	33								5	5	5	10	15	20	25	30	30				
36								5	5	5	10	15	20	25	30	30					
39								5	5	5	10	15	20	25	30	30					
42								5	5	5	10	15	15	20	25	30	30				
45								5	5	5	10	10	15	20	25	30	30				
48								5	5	5	10	10	15	20	20	25	30	30			
51								5	5	5	10	10	15	20	20	25	25	30			
Horizontal angle of the batted ball trajectory: 15-30[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								5	5	5										
	3								10	10	5										
	6								10	10	5	25									
	9								10	5	20										
	12								10	5	15	30									
	15								10	5	15	25									
	18								10	10	15	20	30								
	21								10	10	10	20	25	30							
	24								10	10	10	15	25	30							
	27								10	10	10	15	20	25	30						
	30								10	10	10	15	20	25	30	30					
	33								10	10	10	15	20	25	30	30					
36								10	10	10	15	15	20	25	30	30					
39								10	5	10	15	20	25	30	30	30					
42								10	5	10	15	20	25	25	30	30					
45								10	10	10	15	20	20	25	30	30					
48								10	10	10	15	15	20	25	30	30					
51								10	10	10	15	15	20	25	25	30	30				
Horizontal angle of the batted ball trajectory: 30-45[deg]		Horizontal bat angle [deg]																			
		-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20		
Vertical bat angle [deg]	0								5	5	30										
	3								10	10	20										
	6								10	10	15	30									
	9								10	10	10	25									
	12								10	10	10	20	30								
	15								10	10	10	20	30								
	18								10	10	10	15	25	30							
	21																				

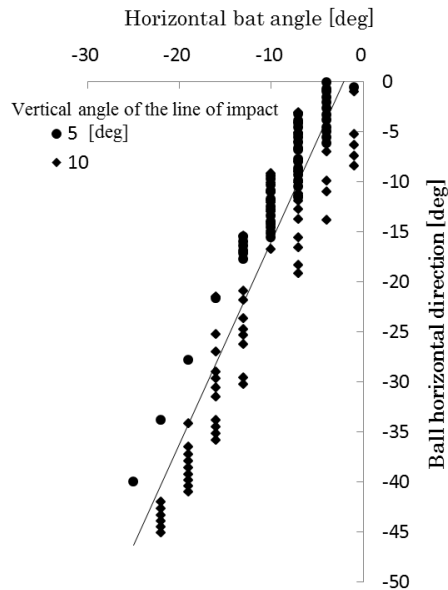


図 2-8 39.5m/s 以上の打球速度が獲得された際のバット水平角と打球方向の関係

3.3 衝撃線角度の増大に伴う打球特性の変化

ボールインパクト時のバット水平角・鉛直角の両角度を一定にした条件下で、衝撃線角度の変化がもたらす打球特性への影響を検証する。この検証は、妥当性検証で用いた実測試技の平均値に最も近い測定値（バット水平角 = -7° 、バット鉛直角 = 27° ）でシミュレーション分析を行った際の出力値を例に挙げて行う（図 2-7、図 2-9）。衝撃線角度が 10° の時、打球は中堅の正面からやや右方向（ -12° ）に、衝撃線角度が 20° の時、打球は右中間方向（ -22° ）に、衝撃線角度が 30° の時、打球は右翼線の近く（ -34° ）に打ち出されることが示された（図 2-9）。このように、同一バット角度であっても衝撃線角度が増大し、よりボールの下部に打撃した試技ほど打球は右翼寄りに飛翔することが確認された。これは城所・矢内（2015）が明らかにしたように、①バットヘッドをグリップエンドよりも低くなるように傾けたバットの上面で（バット鉛直角： 27° ）、②ボールの下部を打撃することにより、右打者の場合にライナーまたはフライが右翼方向に打ち出されるというメ

カニズムの影響を示すものである。さらに、衝撃線角度が増大するほど打球速度は低下する一方で、打球角度は大きくなることも確認された(図 2-9)。この結果は、McBeath et al.(2008) のセンター返しの打球における実験結果と傾向が一致するものであり、バットの向きに関わらず、よりボールの下部を打撃することで打球速度の小さい上向きの打球が打ち出されるという現象を定量的に示すものである。

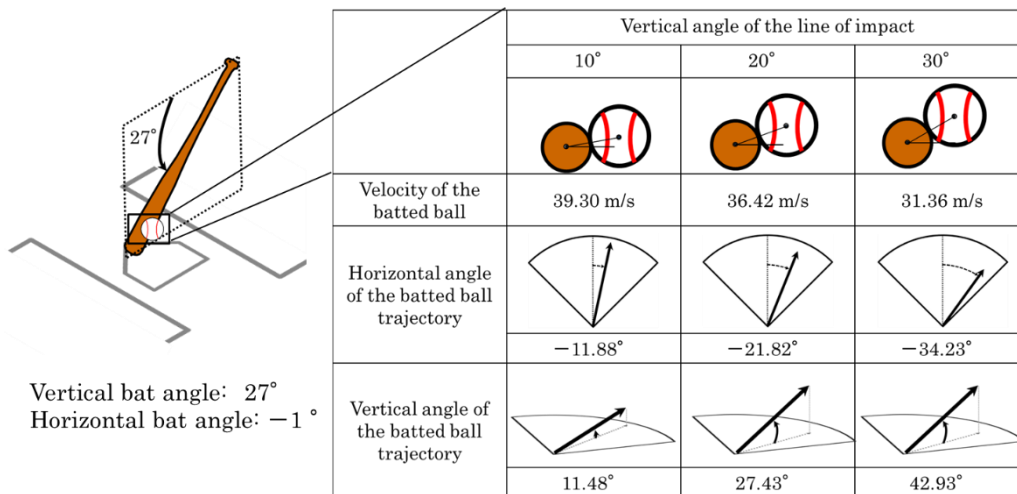


図 2-9 ボールインパクト時のバット水平角・鉛直角の両角度を一定にした条件下で衝撃線角度の変化がもたらす打球特性への影響

3.4 バット鉛直角と衝撃線角度の変化に伴う打球特性への影響

ボールインパクト時のバット水平角のみを一定にした条件下で、バット鉛直角と衝撃線角度の変化がもたらす打球特性への影響を検証する。この検証は、バットの打撃面を中堅方向に向けた条件(バット水平角 = -1°)でシミュレーション分析を行った際の実出力値(図 2-7)を例に挙げて行う。この図が示すのは、バットの打撃面を中堅方向に向けてボールを打撃した場合でも、バット鉛直角と衝撃線角度の組み合わせを変化させることにより中堅、右中間、右翼の3方向すべてに打球を打ち出すことができることである。具体的には、中堅方向には衝撃線角度 5~30°で速度 31.5~40.0m/s の打球を、右中間方向には衝

撃線角度 $15\sim 30^\circ$ で速度 $31.5\sim 38.0\text{m/s}$ の打球を、右翼方向には撃線角度 $25\sim 30^\circ$ で速度 $31.0\sim 34.0\text{m/s}$ の打球を打ち出すことができることを示している。また、各方向に打球が打ち出された試技において、バット鉛直角が増大するにつれて最大打球速度を獲得した際の撃線角度は減少することから、バットヘッドが下方を向くほどライナー性の打球が高速で打ち出されることも示されている。同様の傾向は、バット水平角が -1° に設定された時だけではなく、他のバット水平角における出力値からも観察された (図 2-7)。

バットの打撃面を中堅方向に向けた条件において、バット鉛直角と撃線角度の各組み合わせによって打ち出すことのできる打球方向の範囲を図 2-10 に示す。中堅方向に向いたバットでボールをインパクトする際は、バット鉛直角が 15° を超えた場合にのみ右中間方向へ打球を打ち出すことができ、バット鉛直角が 35° を超えた場合にのみ右翼方向へ打球を打ち出すことができることが示された。図中の境界線は打球が $0, -15, -30, -45^\circ$ に打ち出されたときの撃線角度とバット鉛直角の組み合わせを意味する。中堅方向に向いたバットで指定した方向に打球を打ち出すには、バット鉛直角が 0° に近い際には撃線角度を大きくし、バット鉛直角が増大するにつれて撃線角度を 0° に近づける必要がある。つまり、バットが水平面から大きく下方へ傾かない条件でスイングする際にはボールの下方を打撃し、バットヘッドを大きく下方に傾けてスイングする際にはボールの中心付近を打撃することにより指定した方向への流し打ちが可能になるのである。これは、バット鉛直角と撃線角度のトレードオフの関係により同方向に打球を打ち出すことができることを意味する。撃線角度が 0 に近いほど打球角度の小さく打球速度の高いライナー性の打球となることが確認されていることから、これらの結果はバット鉛直角と撃線角度の組み合わせにより同方向に異なる特性の打球を打ち出すことができることを示すものである。

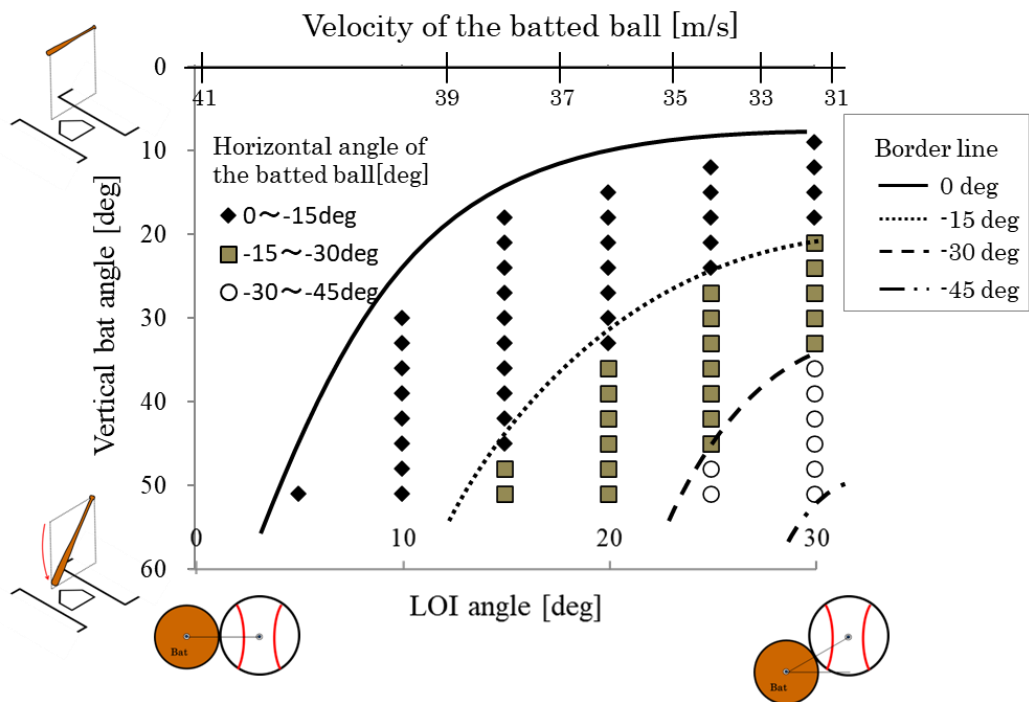


図 2-10 バットの打撃面を中堅方向に向けた条件において、バット鉛直角と衝撃線角度の各組み合わせによって打ち出すことのできる打球方向の範囲とその時の打球速度

3.5 実際の現場での野球選手への一般化

以上の結果を、実際の試合で起こり得る状況に置きかえてみる。投球されたボールの球速の違いやコースの違いによって、バット水平角が限定されることが考えられるが、その場合でもバット鉛直角と衝撃線角度の調整を行うことにより流し打ち方向に打球を打ち出すことは可能である。例えば、スローボールを待ち切れず早いタイミングでスイングを開始した場合はインパクト位置が投手寄りとなり、バット水平角が大きくなる。衝撃線角度が 0° の場合には打球は左翼方向へ打ち出されることになるが、平均的なバット鉛直角 (27°) でスイングされていた場合には衝撃線角度を上昇させること (ボールの下部を打撃すること) によりライナーやフライを中堅方向や右中間方向へ打ち出すことが可能になる。

さらに、バット鉛直角が大きい場合には右翼方向へ打球を打ち出すことも可能になる。打球されたボールの高低に応じてバットの鉛直方向への傾きの範囲は限定されることが考えられるが、その場合でもバット水平角と衝撃線角度の調整を行うことにより流し打ちが可能である。例えば、高めのボールを打撃する際には必然的にバット鉛直角が小さくなることから、衝撃線角度の変化がもたらし得る打球方向の範囲は限定されるが、バット水平角を調整することにより意図した方向への流し打ちが可能になる。逆に低めのボールを打撃する際にはバット鉛直角が大きくなることから、衝撃線角度の変化によってもたらされる打球方向の範囲は非常に広がる。この場合は、バット水平角の大きさや向きにかかわらず、流し打ち方向に打球を打ち出すことが可能になる。このように、ボールの球速やコースによってバット水平角が限定された場合には、そのバット鉛直角に対して最適な衝撃線角度でインパクトすることにより流し打ち方向にライナーやフライを打ち出すことが可能となり、ボールの高さに応じてバット鉛直角が限定された場合には主にバット水平角を調整することによって意図した方向への流し打ちが可能になる。

実際の野球現場での具体的な例として、プロ野球選手を対象にした実測実験結果を表 2-6 に示す。多数あるデータの中から Comparison A では、バット鉛直角と衝撃線角度が同等でバット水平角の異なる試技を、Comparison B では、バット水平角と鉛直角が同等で衝撃線角度の異なる試技を抽出した。このデータから、バット水平角が小さい打球の方がより右翼方向に打ち出されること、および、衝撃線角度が大きな打球の方がより右翼方向への打球が、より低速度で上向きに打ち出されることが確認された。尚、ここで比較した実測試技では打球方向以外の打球特性にも差異が観察される点を確認できるが、その主な原因はボールのインパクト位置 (I.8) に最大で 70mm の差異が生じていたことにある。実測データに基づいた分析ではバットスイングの特徴が試技間で異なるため、インパクト条件を規定する因子の一つ一つが単独で打球方向に及ぼす影響を抽出することは困難であるが、スイングの特徴の詳細に拘らずにインパクト条件の違いを比較した場合においても、

本研究のシミュレーション結果と同様の傾向は確認された。これらの結果から、バットの方位とバット短軸上のインパクト位置の組み合わせがインパクト後の打球特性を決定する重要因子であると考えられる。

本研究の分析結果は、ピッチングマシンを使用し、ボールの回転軸の傾きが x 軸 (図 2-5) とほぼ一致する直球を打撃した結果である。しかし、ボールの回転軸の傾きが変われば、その他の条件が一定であったとしても、インパクト直後のボールに加わる力の向きの違いにより、出力される打球速度ベクトルは異なると考えられる。そのため、ボールの回転軸の異なる球種では、本研究の知見と異なることが予想されるため、本研究の知見はボールの回転軸が進行方向に対して垂直な軸周りにバックスピンする直球を打撃した状況でのみ一般化できると考えられる。

表 2-6 プロ野球選手を対象にした実測実験結果

		The position of ball impact	Vertical angle of the line of impact	Horizontal bat angle	Vertical bat angle
		1.8[mm]	1.9[deg]	1.10[deg]	1.11[deg]
Comparison A	①	717	24.3	25.9	16.5
	②	665	22.9	-25.2	17.1
Comparison B	①	705	5.2	-11.7	14.3
	②	710	23.1	-11.5	19.8

		Velocity of the batted ball	Vertical angle of the batted ball trajectory	Horizontal angle of the batted ball trajectory
		0.1[m/s]	0.3[deg]	0.4[deg]
Comparison A	①	41.6	28.4	33.2
	②	34.2	42.7	-58.2
Comparison B	①	40.0	7.5	-16.3
	②	32.6	36.1	-37.9

4. まとめ

弾性体モデルを用いた 3 次元空間でのシミュレーションを実施する 3 次元インパクトシミュレーション分析の方法論を確立し、流し打ちを行うためのバットの方位（水平面・鉛直面での角度）とボールの衝撃位置の組み合わせ範囲を検証した。その結果、

1. 指定された流し打ち方向に最大の打球速度を獲得するには、バット水平角が意図した打球方向の約 60%の角度となるようにインパクト位置を定め、そこではほぼ正面衝突もしくは、ボールのわずかに下部をインパクト（衝撃線角度 = 5~10°）できるようにボールを打撃する必要があること、
2. 同一バット角度でボールを打撃した場合でも、衝撃線角度が大きい試技ほど（よりボールの下部を打撃した試技ほど）打球は右翼寄りに飛翔すること、
3. バットの打撃面を中堅方向に向けてボールを打撃した場合でも、バット鉛直角と衝撃線角度の組み合わせを変化させることにより水平方向においてフェアグラウンド右半分の全ての方向に打球を打ち出すことができること、
4. ある方向へ打球を打ち出す際のバット鉛直角と衝撃線角度はトレードオフの関係にあること、

が明らかになった。

第3章 『流し打ち』におけるバットの向きとボールインパクト位置の違いによる

飛翔特性変化：野球のインパクトシミュレーション

1. 緒言

『流し打ちの極意』の著者である篠塚和典氏は、極意の一つとして、ボールインパクト時に「手首を立ててヘッドの利いた状態にすることができていれば、ボールに強い力を与えられる」と述べている(篠塚, 2013, pp.54-55)。「バットヘッドを立てる」は野球の指導現場で頻繁に用いられる表現で、インパクトを迎える際にバットヘッドがグリップエンドよりも極端に低い位置を通過するスイングを正す際の指導に用いられる。この指導の目的は、バットヘッドを上げて、ヘッドとグリップが同等の高さにある状態でスイングするように意識づけることにある。このようなスイングで行う流し打ちには、McIntyre and Pfautsch (1982) が述べたような力学的解釈(第1メカニズム)が成り立つ。この解釈によると、バットの水平面上の左右への方位を調整することで、打球を左右に打ち分けることが可能となる。その場合、打球の方向はスイング開始のタイミングに大きく依存すると考えられる。スイング開始のタイミングが早く、投手寄りでインパクトした場合には左翼方向、振り遅れて捕手寄りでインパクトした場合には右翼方向に打球が放たれることになる。また、このときにボールをバットの芯でとらえることができれば、飛距離の大きい打球を放つことが可能となる。しかし、ボールの上端や下端を打撃した場合はゴロやフライとなるため、飛距離を獲得するには最適なバットとボールの位置関係でボールをミートする必要がある。

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として第2メカニズム(城所・矢内, 2015)がある。このメカニズムにより右打者は左翼方向を向いたバットで右翼方向へ流し打ちをすることが可能になる反面、バットヘッドがグリップエンドよりも低くなるようなスイングをする場面ではインパクトの瞬間のミートポイントが目から遠くなるため正確にボールを捉えることが難しくなると考えられる。また、打撃の指導書によると、

「ヘッドが下がった状態でボールに当たると、ボールはスライス回転し、その結果、右打者であれば弱々しいボールが一塁方向へのファールに流れていってしまう」とされる(古田, 2010, p.90). このように一般的に、バットヘッドが下がった状態でのスイングでは、飛距離は出にくいと考えられている。しかし、プロ野球中継等では低めに投球されたボールに対しバットヘッドを下げてインパクトし、右翼方向に飛距離の大きな打球を流し打ちする場面を見ることがある。一流選手はこのようなスイングでも的確なインパクトポイントを見極めて痛烈な打球を放っている。流し打ちによる打球速度が最大になるインパクト条件は第 2 章の結果により明らかになっているが、打球速度が最大になる場合でも打球角度の違いによってライナーやゴロとなることから、大きな飛距離の流し打ちを可能にするインパクト条件は異なるものと考えられる。

インパクト時のバットの方位(水平面への投影角と鉛直面への投影角)とバット短軸上のインパクト位置の組み合わせによってインパクト後の打球特性は様々に変化すると考えられるが、どのような組み合わせによって、ある決まった方向に大きな飛距離の打球を放つことが可能となるのかは分かっていない。また、同一飛距離の場合、よりライナー性で飛翔時間が短い打球のほうが野手にとって捕球しにくい打球となるため、打球特性をもとに飛翔軌道を分析すれば、安打となりやすい打球特性の判定や可視化が可能となる。そこで、本研究の目的は、弾性体モデルを用いた 3 次元インパクトシミュレーション分析により、指定された方向に流し打ちする際に飛距離を最大化するために最適なバットの方位(水平面・鉛直面での角度)とボールの衝撃位置の組み合わせを明らかにすること、および、ボールインパクト時のバットの方位が打球特性(インパクト直後の速度、角速度、角度)および飛翔特性(距離、軌道、飛翔時間)に及ぼす影響を検証することとした。

2. 方法

有限要素法を用いたシミュレーションによりボールとバットの打撃時における挙動を分析した。シミュレーションモデルは先行研究（宮澤ほか，2011）において精度検証のなされたものを用い，インパクト後の打球特性の算出には第2章と同様の方法論を用いた。

2.1 飛距離の算出方法

打球特性の一つとして，打球が地面にバウンドするまでの水平移動距離（飛距離）を推定した。推定値は，第2章で算出したインパクト直後のシミュレーションの出力変数（図2-5: 0.1~0.4）を入力値として，ボールに働く力についての運動方程式（式(3-1)）を数値解析することにより求めた。

$$m_{ball} \cdot \vec{a} = \vec{F}_d + \vec{F}_L + m_{ball} \cdot \vec{g} \quad (3-1)$$

m_{ball} はボール質量 [kg]， \vec{a} はボールの加速度 [m/s²]， \vec{F}_d は抗力 [N]， \vec{F}_L は揚力 [N]， \vec{g} は重力加速度 [m/s²] とした。抗力 \vec{F}_d および揚力 \vec{F}_L は以下の式（3-2，3-3）により算出した。

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \hat{v} \quad (3-2)$$

$$\vec{F}_L = -\frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

ρ は空気密度 [kg/m³]， A はボールの断面積 [m²]， v は速度ベクトルの大きさ[m/s]， \hat{v}

は速度ベクトルの向きを示す単位ベクトル， $\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix}$ は揚力の向きとした。

揚力ベクトル \vec{F}_L （式(3-3)）の向きは，打球速度ベクトル \vec{v} および，ボールの回転軸

\vec{u}_{axis} と直交するため， $\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix}$ は次のように表した（式(3-4)）。

$$\begin{aligned}
 e_x &= (\cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\theta + \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\alpha) \\
 e_y &= -(\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\theta + \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha) \\
 e_z &= \cos\alpha \cdot \cos\theta(\cos\beta \cdot \cos\varphi - \sin\beta \cdot \sin\varphi)
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} e_x \\ e_y \\ e_z \end{aligned}} \right\} \quad (3-4)$$

α は打球角度、 β は打球方向とし、ボールの回転軸 \vec{u}_{axis} は進行方向に対して直角かつ、地面に水平な状態から上下方向 θ および前後方向 φ に傾いた状態とした(図 2-5)。

揚力係数 C_L については、スピンパラメータ S を用いて表すことができる (Meyer and Bohn, 2008) (式 (3-5))。また、スピンパラメータ S は以下の式で示されるように、打球速度、打球の角速度によって決定される。

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{r\omega}{v} \quad (r : \text{ボール半径 [m]}) \\
 C_L &= 1.5S \quad (S \leq 0.1) \\
 C_L &= 0.09 + 0.6S \quad (S > 0.1)
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} S \\ C_L \\ C_L \end{aligned}} \right\} \quad (3-5)$$

これらの式 (3-3), (3-4), (3-5) より、揚力を決定する要因は、打球速度、打球角度および打球の角速度であることが示される。

式 (3-2) の抗力係数 C_d は Jezorek and Moura (2004) で報告されるように、速度により決定される変数である。レイノルズ数 Re は、式 (3-6) で表わされる。

$$Re = \frac{vd}{\gamma} \quad (3-6)$$

d はボール直径 [m]、 γ は空気の動粘性係数 [m^2/s] とした。

抗力係数 C_d は、Jezorek and Moura (2004) が実測により求めた 3 つの近似式にもとづいて、レイノルズ数 Re に対応する値として推定できる (式 (3-7))。

$$\left. \begin{aligned}
C_d &= 0.5 & Re &\leq 1.35 \times 10^5 \\
C_d &= 0.5 - \left(\frac{0.5-0.2}{2.8 \times 10^5 - 1.35 \times 10^5} \right) (Re - 1.35 \times 10^5) & 1.35 \times 10^5 &\leq Re \leq 2.8 \times 10^5 \\
C_d &= 0.2 & 2.8 \times 10^5 &\geq Re
\end{aligned} \right\} (3-7)$$

これらで示されるように、揚力と抗力が速度の関数であることから、飛距離を算出するための数値解析には陽解法による差分法を用いた。式 (3-1) で算出した加速度 \vec{a} が微小時間内は一定であるとみなして Δt 秒後 (2 ms) の打球速度 \vec{v} (式 (3-8)) と位置座標 \vec{s} (式 (3-9)) を算出した。

$$\vec{v}_{t+\Delta t} = \vec{v}_t + \vec{a}_t \cdot \Delta t \quad (3-8)$$

$$\vec{s}_{t+\Delta t} = \vec{s}_t + \vec{v}_t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \vec{a} \Delta t^2 \quad (3-9)$$

$$\vec{s}_{t+\Delta t} \cong \vec{s}_t + \vec{v}_t \cdot \Delta t \quad (3-9')$$

本研究では、 $\Delta t = 0.002$ [s] としたので、 $\Delta t^2 = (0.002)^2$ [s] の値は非常に小さくなる。そのため、位置座標 (式 (3-9)) の右辺第 3 項は誤差項とみなし、式 (3-9') で近似した式を用いた。そして、算出された Δt 秒後の打球速度 $\vec{v}_{t+\Delta t}$ から同時刻における抗力と揚力を算出し、これらの値を次のループにおける初期値として式 (3-1) に代入するという手順を繰り返すことにより飛距離と飛翔時間を算出した。また、落下地点の方向 (センターラインを 0° として右翼方向を負とした) を静止座標系 R_{xyz} の x および y 座標の値から算出した。全シミュレーション結果の中には左翼方向、右翼線フェールゾーン、さらにはバックネット後方に飛ぶようなフェールとなる打球も存在した。しかし、野球の試合において in play になる打球の大半がフェアゾーンに打ち出された打球で、かつ本研究の趣旨は流し打ちの研究であることから、打球がセンターラインから右翼線までのフェアゾーンの範囲内 ($-45 \sim 0^\circ$) に落下した試技のみを分析対象とした。そして、横軸をバット水平

角，縦軸をバット鉛直角とした 2 次元平面を 3°ずつ区分けした小領域で，衝撃線角度を 5~30°の範囲内で 5°ずつ変化させた際に得られた飛距離の最高値を，各小領域での「最大飛距離」と定義した。

2.2 数値解析による飛翔軌道の妥当性検証

本研究では飛距離，並びに落下地点の方向の妥当性を検証した。検証には城所・矢内(2015)の研究において収集した大学野球選手16名が行ったマシン打撃による流し打ち(打球の飛距離が40m以上で，センターラインから右翼線までのフェアゾーンの範囲内に落下した146試技)の内，バットの芯付近 [$604 \leq L \leq 730$] でボールをインパクトし，かつ衝撃線角度が30°以下であった116試技を用いた。その結果，実測値とシミュレーション値の間には，飛距離，および落下地点の方向のすべてにおいて，1%水準で有意な相関関係(飛距離 $r = 0.967$ ，落下地点の方向 $r = 0.968$) が認められた。一方，飛距離および落下地点の方向において，シミュレーション値が実測値に対して有意に低い値(飛距離：誤差 $5.9 \pm 3.2\text{m}$ ，落下地点の方向：誤差 $0.7 \pm 2.8^\circ$) であった。この飛距離の誤差を補正し分析精度を高めるために，実測値をシミュレーション値の関数として推定する一次回帰式を求めたところ，回帰直線の傾きが1.0となった(飛距離 $y = 1.0x - 0.000005$)。この結果は，シミュレーション出力の試技間差は実測値の試技間差を正確に反映すること，及び定数(回帰式のy切片)を誤差要因として補正すればシミュレーション出力値は十分に高い精度で打球特性が得られることを意味する。したがって，本研究の結果には回帰式により補正した値を用いた。

3. 結果と考察

3.1 ボールインパクト時のバット水平・鉛直角と獲得可能な最大飛距離

バットの水平角と鉛直角の各組み合わせについて算出された最大飛距離 (図3-1 (a)) とこれが獲得された際の打球速度 (図3-1 (b)), 落下地点の方向 (図3-1 (c)) および衝撃線角度 (図3-1 (d)) を示す. 横軸のバット水平角は左寄りのマイナス方向ほどバットの打撃面が流し打ち方向を向く状態を表し, 縦軸のバット鉛直角は値が大きくなるほどバットヘッドが下方を向いた状態を表す. 各小領域の最大飛距離は衝撃線角度を $5\sim 30^\circ$ の範囲内で 5° ずつ変化させた際に得られた最高値とした (図3-1 (a)). 打球速度 (図3-1 (b)) は, メッシュの切り方による算出誤差 ($0.2\sim 0.3$ m/s) を上回るinterval (0.5 m/s単位) で示した. バット水平角については $-31\sim 20^\circ$ の範囲内で 3° ずつで分析を行ったが, 本研究の設定内でグラウンドの右半分のフェアゾーンに落下した試技の範囲におけるバット水平角が $-19\sim 20^\circ$ であったため, 図3-1ではこの範囲に限定して結果を示した.

90m以上の大きな飛距離は, バット水平角が $-16\sim 11^\circ$, バット鉛直角は $0\sim 45^\circ$ の条件で記録された. これらの打球の落下地点は中堅方向 (-0.1°) から右翼線方向 (-43.8°) まで広範囲にわたっており, 衝撃線角度はすべて 20° であった. この結果から, バット水平角は 27° 程度の幅を, バット鉛直角は 45° 程度の幅をもつ広範囲内の組み合わせの中で, ボールの約 20° 下部をインパクトすることによって, 中堅方向から右翼線方向に落下する90m以上の大きな打球を放つことが可能となることが明らかになった. これらの打球の中にはバットの打撃面が左翼方向を向いたものも存在していることから, バットヘッドを下方に傾けることで, バットの打撃面が左翼方向を向いていても飛距離の大きな流し打ちが可能となることが示された. 一方, 同範囲のバット角 (バット水平角が $-16\sim 11^\circ$, バット鉛直角は $0\sim 45^\circ$) でのインパクトであっても, バットの打撃面を 10° 以上右翼方向に向けてインパクトした際の落下地点は, バットの打撃面の向きを大きく上回る角度 ($> 200\%$) となり, 右中間から右翼線方向に落下することが明らかになった. また, このと

き打球速度はすべて36.5m/sであり、本研究で獲得した最大打球速度 (40.0m/s) の90%を上回る値であった。打球速度は投球角度 (I.3), スイング角度 (I.5), 衝撃線角度 (I.9) が一致する直中心衝撃において最大となることが報告されている (McBeath et al., 2008)。本研究では、投球角度, スイング角度, 衝撃線角度が一致しない斜中心衝撃であるが、衝撃線角度がスイング角度 (4°で一定とした) に近い値 (5°) を取る場合に打球速度は最大化し、衝撃線角度が増大するほど打球速度は低下した。しかし、打球の初速度が最大値の約90%程度 (36.5m/s) まで低下していても、ボールの約20°下方を叩き、打球にバックスピンの加えられたことで大きな揚力の影響を受けた結果、90m以上の大きな飛距離を獲得できたと考えられる。

最大飛距離が90mを下回る小領域に着目すると、バットの打撃面が大きく右翼方向を向き、かつバットヘッドが下方を向いたインパクト条件においては、20°よりも小さい衝撃線角度で放たれたライナー性の打球が多く見られた (図3-1 (a))。これは、バット水平角による第1メカニズム (城所・矢内, 2017a) の貢献が大きいため、打球をフェアゾーン (-45°~0°) に落下させるには第2メカニズムの影響を小さく抑えるインパクト条件が必要であったことを示すものである。したがって、バット鉛直角が大きい打撃においては衝撃線角度が0°に近いインパクト条件である必要があったため、打球がライナー性となったものと考えられる。

(a) Maximum flight distance [m]		Horizontal bat angle [°]														
		-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20	
Vertical bat angle [°]	0	85.3	92.4	92.7	94.0	94.5	94.9	95.6								
	3	68.1	91.9	92.4	93.3	93.9	94.4	94.8								
	6	23.3	91.8	91.2	92.9	93.0	93.7	94.2								
	9	22.0	84.0	90.6	91.9	92.7	93.2	93.6	94.8							
	12	21.1	61.7	90.1	92.0	91.9	92.5	92.7	93.5							
	15	19.5	60.2	89.0	90.6	91.6	92.0	92.1	92.8							
	18	17.9	58.2	87.5	89.6	90.1	90.7	91.2	92.4	84.1						
	21	17.5	55.5	87.0	88.5	89.2	90.4	90.6	90.8	92.2	62.7					
	24	17.5	53.9	87.9	87.6	88.3	88.4	88.4	90.6	91.6	62.9	63.0				
	27	17.6	51.8	76.1	86.1	87.2	87.5	87.4	88.1	90.6	84.8	64.1	64.0			
	30	17.5	49.2	74.2	85.1	86.0	87.0	86.5	87.5	90.0	92.8	64.7	63.8			
	33	16.8	46.6	71.5	83.5	84.1	85.3	84.7	86.6	89.1	91.6	84.8	64.4			
	36		43.3	69.2	80.3	82.9	83.4	84.2	84.4	87.0	90.4	84.4	65.7			
	39		40.7	66.4	79.9	81.2	81.4	81.5	83.1	86.3	88.9	85.5	66.7	66.8		
	42		38.6	41.8	77.6	78.4	79.3	80.5	80.9	84.2	88.0	91.5	84.9	67.8		
45		35.1	39.4	76.0	76.3	78.3	79.5	80.5	81.1	85.9	90.3	86.1	68.7			
48		32.3	37.2	59.5	73.6	77.5	76.8	79.9	80.8	83.4	87.6	85.4	70.1	69.4		
51			28.9	34.3	55.9	70.9	74.9	76.2	77.9	77.7	81.7	86.3	85.0	71.4	71.2	

(b) Velocity of the batted ball [m/s]		Horizontal bat angle [°]														
		-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20	
Vertical bat angle [°]	0	34.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5								
	3	31.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5								
	6	39.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5								
	9	39.5	38.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5							
	12	39.5	39.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5							
	15	39.5	39.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5							
	18	39.5	39.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5						
	21	39.5	39.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	31.5					
	24	39.5	39.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	31.5	32.0				
	27	40.0	39.5	38.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5	32.0	32.0			
	30	40.0	39.5	38.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	31.5	31.5			
	33	40.0	39.5	38.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5	31.5			
	36		39.0	38.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5	31.5			
	39		39.0	38.0	36.5	34.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5	31.5	31.5		
	42		39.5	39.0	36.5	36.5	34.0	34.0	36.5	36.5	36.5	36.5	34.5	31.5		
45		39.5	39.0	36.5	36.5	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	36.5	36.5	34.5	31.5		
48		39.5	39.5	38.0	36.5	34.0	34.0	34.0	34.0	36.5	36.5	34.0	31.0	31.5		
51		39.5	39.5	38.0	36.0	34.0	34.0	34.0	36.5	36.5	36.5	34.0	31.0	31.5		

(c) Direction of the ball landed point [°]		Horizontal bat angle [°]													
		-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20
Vertical bat angle [°]	0	-44.1	-40.2	-33.3	-23.9	-16.3	-9.2	-0.9							
	3	-44.8	-42.4	-35.0	-25.9	-19.1	-11.1	-4.3							
	6	-43.7	-43.8	-36.6	-28.1	-20.8	-13.9	-6.5							
	9	-43.9	-44.0	-39.0	-30.5	-23.2	-15.8	-9.0	-0.8						
	12	-44.1	-40.9	-40.4	-31.4	-25.0	-17.8	-11.4	-3.7						
	15	-44.1	-41.6	-41.9	-33.8	-26.8	-19.4	-13.6	-6.0						
	18	-44.3	-42.2	-43.4	-36.3	-28.8	-21.8	-14.9	-7.8	-3.3					
	21	-44.4	-42.7	-43.8	-37.5	-30.2	-23.2	-16.7	-10.0	-2.9	-7.7				
	24	-44.7	-43.3	-44.6	-38.5	-31.7	-25.7	-19.8	-11.6	-5.0	-6.1	-4.7			
	27	-44.8	-43.7	-42.4	-40.3	-33.1	-26.9	-21.1	-14.2	-7.3	-2.4	-9.1	-0.7		
	30	-44.9	-43.9	-43.0	-40.7	-34.1	-28.0	-22.8	-15.4	-9.1	-0.3	-11.5	-2.0		
	33	-44.9	-44.3	-43.9	-41.8	-35.4	-29.5	-23.9	-16.8	-10.9	-2.7	-0.3	-2.3		
	36		-43.7	-44.6	-43.6	-36.5	-30.6	-25.0	-18.6	-12.0	-4.8	-5.1	-2.5		
	39		-44.6	-45.0	-43.5	-44.1	-31.8	-25.9	-19.8	-13.8	-6.8	-3.9	-9.6	-2.8	
	42		-44.7	-38.0	-44.4	-38.7	-41.1	-35.4	-21.1	-15.4	-8.3	-0.1	-1.3	-1.6	
45		-44.6	-37.9	-44.7	-39.2	-41.9	-36.4	-29.6	-24.1	-10.0	-2.1	-0.8	-2.0		
48		-44.3	-37.9	-39.5	-39.6	-42.4	-37.9	-30.3	-25.8	-11.6	-4.4	-4.3	-6.0	-0.9	
51		-43.9	-37.7	-39.5	-40.1	-43.7	-37.6	-31.8	-19.1	-12.8	-5.7	-6.4	-10.0	-0.8	

(d) LOI angle [°]		Horizontal bat angle [°]													
		-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	2	5	8	11	14	17	20
Vertical bat angle [°]	0	25	20	20	20	20	20	20							
	3	30	20	20	20	20	20	20							
	6	5	20	20	20	20	20	20							
	9	5	15	20	20	20	20	20	20						
	12	5	10	20	20	20	20	20	20						
	15	5	10	20	20	20	20	20	20						
	18	5	10	20	20	20	20	20	20	25					
	21	5	10	20	20	20	20	20	20	20	30				
	24	5	10	20	20	20	20	20	20	20	30	30			
	27	5	10	15	20	20	20	20	20	20	25	30	30		
	30	5	10	15	20	20	20	20	20	20	20	30	30		
	33	5	10	15	20	20	20	20	20	20	20	25	30		
	36		10	15	20	20	20	20	20	20	20	25	30		
	39		10	15	20	25	20	20	20	20	20	25	30	30	
	42		10	10	20	20	25	25	20	20	20	20	25	30	
45		10	10	20	20	25	25	25	25	25	20	20	25	30	
48		10	10	15	20	25	25	25	25	25	20	20	25	30	30
51		10	10	15	20	25	25	25	25	20	20	20	25	30	30

図 3-1 バットの水平角と鉛直角の各組み合わせについて算出された最大飛距離 (a) とこれが獲得された際の打球速度 (b), 落下地点の方向 (c) および衝撃線角度 (d)

3.2 バット鉛直角の変化に伴う打球特性の変化

バット鉛直角に着目して図3-1 (a) をみると、バット鉛直角が 0° に近い打撃ほど、同一バット水平角における最大飛距離は大きいことが確認された。全領域内での最大飛距離は95.6mで、この打球はバット鉛直角が 0° でバット水平角が -1° という条件で放たれ、 -0.9° の地点に落下したものであった。バット鉛直角が 0° の打撃に着目すると、90m以上の最大飛距離はバット水平角が -16° ~ -1° の範囲の際に獲得された。その際の落下地点の方向は -40.2° ~ -0.9° で中堅方向から右翼線方向まで広範囲に及んでいた。これらの結果より、バットを水平にしたインパクト条件においては、バットの打撃面を投球されたボールに正対させるようにインパクトすることでセンター方向に飛距離の大きな打球が放たれること、並びにバットの打撃面が右翼を向くほどその角度に応じた打球が右翼方向に放たれることが確認された。これは、バットの水平面上の左右への方位が投球に対して入射角を生じさせ、この反射角によって打球が左右に放たれるという水平面上での二次元的な斜衝撃運動として説明できる。このようなインパクト、つまり、バットヘッドを下げずにバットを水平に保ってインパクトすることで流し打ちをする場合は、捕手寄りの位置でボールをインパクトすることとなるため、打者はスイング開始のタイミングを遅らせることによって打球を放つことになる。したがって、打者にとって意図した方向へ打球を放つための方法は明瞭かつ直感的に理解し実行できると考えられる。一方で、テイクバック後にスイングが開始されるとバットのグリップエンドはバットヘッドに先行して移動するため、捕手寄りの位置でボールをインパクトする際には振り始めの段階からインパクトまでの全局面においてバット水平角が負の値（右翼方向）になることから、どの方向に打球が飛ぶかが予め野手に推測されかねないと考えられる。

バット鉛直角が大きい場合は、90m以上の飛距離を獲得できるバット水平角の範囲が狭くなり、同一小領域における最大飛距離は全体的に小さくなった。一方、飛距離の大きさを差し置いて、流し打ち方向に打球を放つことを可能にするバット水平角の範囲に着目

すると、バット鉛直角が 0° の際には -19° ~ -1° 、バット鉛直角が 51° の際には -16° ~ 20° となり、バットが下方を向くほど広範囲におよんだ (図3-1 (a)). また、流し打ちの可能な最大水平バット角は、バット鉛直角が 0° の際には -1° 、バット鉛直角が 51° の際には 20° となり、バットが下方を向くほど、より大きく左翼方向に向いたバットで流し打ちが可能なことが確認された。さらに、落下地点はバット鉛直角が 51° の際には -43.9° ~ -0.8° となり、中堅方向から右翼線方向まで広範囲において打球が放たれることが確認された (図3-1 (c)).

このように、バットヘッドが下方を向くほど、流し打ち方向 (グラウンドの右半分) に落下する打球のバット水平角は広範囲に及ぶ。この現象は、バット鉛直角が大きい場合ほど打球方向は衝撃線角度の小さな変化に敏感に反応することに起因する。つまり、打球方向が衝撃線角度の変化に応答する感度はバット鉛直角の大きさに応じて高くなるのである。

このような特徴を有するスイングをする打者は、インパクト時のバット角度から打球方向を予測することは困難なため、どの方向に打球が飛ぶかが野手に推測されにくいという利点がある。また、バット鉛直角が大きい場合には、投手寄りから捕手寄りまでの広範囲のいずれの位置でボールインパクトをしても流し打ちが可能であるため、タイミングを早めても遅らせても流し打ちができることになる。逆にこのことは、このようなスイングをする打者にとっては意図した方向へ打球を放つことが困難になることを意味する。バットヘッドが大きく下方を向くスイングによる打撃では、流し打ちが可能になるバット水平角が広範囲に及ぶ反面、大きな飛距離を獲得できるバット水平角の範囲は狭くなる。そのため、打球方向を限定して飛距離の大きい打球を放つには、狭いバット水平角の範囲内で適切な衝撃線角度となる限られた範囲のミートポイントでボールを打撃する正確性が必要となる。

したがって、バットヘッドが下方を向いたスイングで飛距離の大きな流し打ちをするためには、投球されたボールに応じてバットの向きを精密に調節する必要がある。これらのことから、一般的に「バットヘッドを立て」て、つまりインパクトの瞬間に打者がバットヘッドを下げずにスイングするように指導されるのは、このようなスイングでボールをイン

パクトすることにより、打者が意図した方向へ打球を放つための方法が明瞭かつ直感的になり、かつ大きな飛距離の打球を放つことのできる可能性が高くなるからと考えられる。一方、バットヘッドをグリップエンドよりも低くなるように傾け、低めに投球されたボールを打撃することにより流し打ち方向へホームランを放つというような打撃は、限定されたバットの向きとボールとバットの位置関係（衝撃線角度）でインパクトする必要があるため、より精度の高いインパクト技術が必要であると考えられる。

3.3 バット角度の違いによる飛翔特性

バット角度（水平角・鉛直角）の違いによる打球の落下地点の特徴を検証するため、バット鉛直角の範囲を等間隔に4分割して抽出した5種のバット鉛直角（0, 12, 24, 36, 48°）のそれぞれについて、バット水平角の変化に伴う落下地点の変動を図示した（図 3-2）。バットの打撃面が大きく右翼方向を向いた際の右翼線寄りの打球の多くは、飛距離こそ大きくはないが飛翔時間が3秒未満のライナー性の打球であった。そのため、一塁手より後方に落下した場合、図 3-2 のようにフェアゾーンぎりぎりに落下するライナー性の打球は、右翼手の定位置からも離れているため長打となる可能性が高くなると考えられる。また、飛距離の大きい打球は飛翔時間が長くなるが、一方でバットヘッドが下方に傾いた際に80~90m程度の飛距離で飛翔時間が3秒台（図 3-2, 灰色落下地点）のものが多く見られた。塁上に走者がいない場合、一般的に中堅守の定位置の目安は本塁と二塁を結んだ線の延長線上、右翼守の定位置の目安は一塁と二塁の中間地点と本塁を結んだ直線上と言われている（菊池, 2016, pp.26-29）。そのため、この双方の守備位置から遠く離れた右中間や右翼線寄りに飛翔時間が短い打球が落下した場合、打球が外野手の間を抜けてヒットになる確率が高くなると考えられる。

バットの打撃面が投球に対してほぼ正対し（バット水平角 = -1° ）、かつ衝撃線角度が 20° のときの打球特性および飛翔特性を図 3-3 (a) に示す。また、バット水平角の違いに

よる比較検証を行うため、バット水平角が -10° で、その他の条件を上記と同様としたものを図 3-3 (b) に示す。バットの打撃面がほぼ中堅方向を向いたとき、バットヘッドが水平に近いほど飛翔時間が長く、飛距離の大きな中堅方向への打球となり、バットヘッドが下方に傾くほど、飛翔時間が短く、飛距離が小さい右翼方向への打球となった。また、バットヘッドが下方に傾くほど、打球方向と落下地点の方向の差が大きくなることから、野手にとってインパクト直後の打球から軌道を予測し捕球することが難しい打球になると考えられる。また、バットの打撃面が右翼方向に 10° 向いたとき (図 3-3 (b)) とほぼ中堅方向を向いたとき (図 3-3 (a)) を比較すると、同一バット鉛直角でもバットの打撃面が右翼方向を向いた打球のほうが、より右翼方向に逸れ、より飛翔時間が短く、より飛距離の短い打球となった。打球の飛翔軌道に着目すると (図 3-4)、バットヘッドが下方に傾くほど、打球が右翼方向に逸れる幅が広くなり、飛距離も小さくなることがわかる。これは、バットヘッドを下げたインパクトするほどボールの回転軸が傾き、揚力の影響により打球の軌道が右翼方向に大きく逸れることが原因の一つであると考えられる。

投球されたボールのコース別にボールインパクト位置を分析すると、インコースは投手寄り、アウトコースは捕手寄りでインパクトされやすいことが先行研究のデータに示されている (城所・矢内, 2017a)。実際のバッティングにおける傾向を踏まえて本研究の結果を解釈すると、アウトコースのボールを捕手寄りの位置でインパクトする際、バットの打撃面は右翼方向を向きやすいため、なるべくバットを傾けずに水平に保った状態でインパクトすることで飛距離の大きな打球を放つことができると考えられる。また、アウトコース低目を打つ場合、バットヘッドを下げる必要があるが、この時、バットの打撃面を右翼方向に向けすぎるとボールは右翼線フェールゾーンへ飛翔するため、意図した打球方向よりもバットの打撃面を中堅あるいは左翼方向に向ける必要がある。一方、インコースのボールを投手寄りでインパクトする際はバットの打撃面は左翼方向を向きやすい。流し打ち方向に打球を放つためには、2 つの方法が考えられる。1 つはバットヘッドを残し、バツ

トの打撃面を右翼方向に向けてインパクトする方法である。この方法は水平面上の斜衝撃として捉えることができるため直感的に理解しやすく、『バットを立ててインパクトする』という一般的な指導を実践するものである。もう一つの方法はバットヘッドを下方に傾け、バットの打撃面が左翼方向へ向けてインパクトするもので、衝撃線角度の大きさを調整することによって意図する方向へ流し打ちするものである。打球方向が衝撃線角度の小さな変化に対して敏感に反応することから、意図する方向へ流し打ちするには精度の高いバットコントロールが求められる。このように、コースに応じてボールインパクト位置が投手寄りもしくは捕手寄りとなる違いはあるが、バットの向きと短軸上のインパクト位置の組み合わせによって打球方向を広い範囲に拡散させることができること、および意図した方向へ打球を放つ際に求められるバットコントロールの精度がバット鉛直角の大きさによって異なることが示された。一連のスイング動作の中で、スイングを開始してからインパクト直前にバットのスイング軌道を修正することは難しい。また、スイング動作の中で、最もボールに力を加えられるポイントでインパクトしなければ、大きな打球速度は獲得できない。そのため、基本的にはスイングの軌道の中で、タイミングを合わせてバットの打撃面を調整することで流し打ちの成功確率は高まると考えられる。しかし、投手にタイミングを外された場合や低めの投球に対してバットを傾けて打つ必要がある場合には、鉛直バット角と衝撃線角度の調整を行うことが流し打ちを成功させる手段の一つとなり得る。

本研究の主なりミテーションは、スイングに関する入力値を設定する際に 3 項目のみを変動させ他の項目は一定としたため、3 項目の変動に伴って他の項目が変化する可能性を考慮していないことである。連動して変化する可能性のある項目としてあげられるのは、①バット水平角の変化に伴って増減する可能性のあるスイング速度、②バット鉛直角と関連のある打点高 (城所・矢内, 2017a)、および、③スイング軌道に影響を及ぼすと考えられる投球角度である。①について、実際のスイングにおけるスイング速度は、スイング開始からインパクトの瞬間まで増加し続ける特徴がある (Tabuchi et al., 2007) ため、一連

のスイングの中でバットヘッドが捕手側から投手側へ移動するにつれてスイング速度は増大し、バット水平角がプラス方向に向くほどスイング速度は大きくなると考えられる。この影響を検証するため、インパクト直前 0.05s の期間でバット水平角が 100°増加する間にバットのヘッド速度は 10m/s 増加したことを報告した森下ほか (2015) の研究を参考に、追加のシミュレーション分析を行った。その結果、バットの打撃面が右翼方向を向くものほど補正後の打球速度は低下し、左翼方向を向くものほど補正後の打球速度は増加することが確認されたが (最大で 2m/s)、打球速度以外の打球特性は補正前とほぼ一致し、飛距離の増減は最大で 5m にとどまることが確認された。②については、バット鉛直角の大きい打撃ほど打点高が低い傾向があるため (城所・矢内, 2017a)、それに伴い投球角度も大きい傾向にあると考えられる。投球角度が打球に及ぼす影響を検証するため、バット鉛直角を最大値 (51°) に設定した際の投球角度を増大 (7.5°) させ、その影響を分析した。その結果、投球角度の変化が打球速度や打球の角速度、打球左右方向に及ぼす影響は限定的で、それぞれ 0.1 m/s, 0.2 rps, 0.1°以下であった。③のスイング軌道については、シミュレーションにおけるインパクト直前のヘッド速度のベクトルの向きと捉えることができる。志村ほか (2012) による研究では、バットスイングの軌道を、ボールインパクト直前においてバットのヘッド速度ベクトルが水平線に対してなす角度 (スイング角度) として定義し、ダウンスイング (-10°)、レベルスイング (0°)、アッパースイング (10°, 20°) での打球特性を分析している (図 3-5)。本研究において、シミュレーションモデルの妥当性検証の際に用いたスイング角度 (I.5) の実測値は $4.3 \pm 3.9^\circ$ であったことから、この範囲に限定すると、衝撃線角度 5~20° でのスイング軌道の違いによる打球速度の影響は 2m/s 程度であることが確認された。これより本研究で最大打球速度を獲得した衝撃線角度 5~10°、および最大飛距離を獲得した衝撃線角度 20°でのスイング軌道の違いによる打球速度の影響は限定的であると言える。さらに、この現象は、流し打ちのスイングの際にバットの打撃面やバットヘッドがどの方向を向いていても、系統的に起こりうると考え

られる。以上のように、3 項目の変動に伴って他の項目が変化する可能性があり、本研究で設定したインパクト条件には現実の打撃で起こり得る範囲を超える可能性のある試技が含まれると見込まれるものの、その影響は本研究の結果や得られた知見を覆すものではないことから、本研究の方法論は適切であり、得られた知見は信頼できると考えられる。

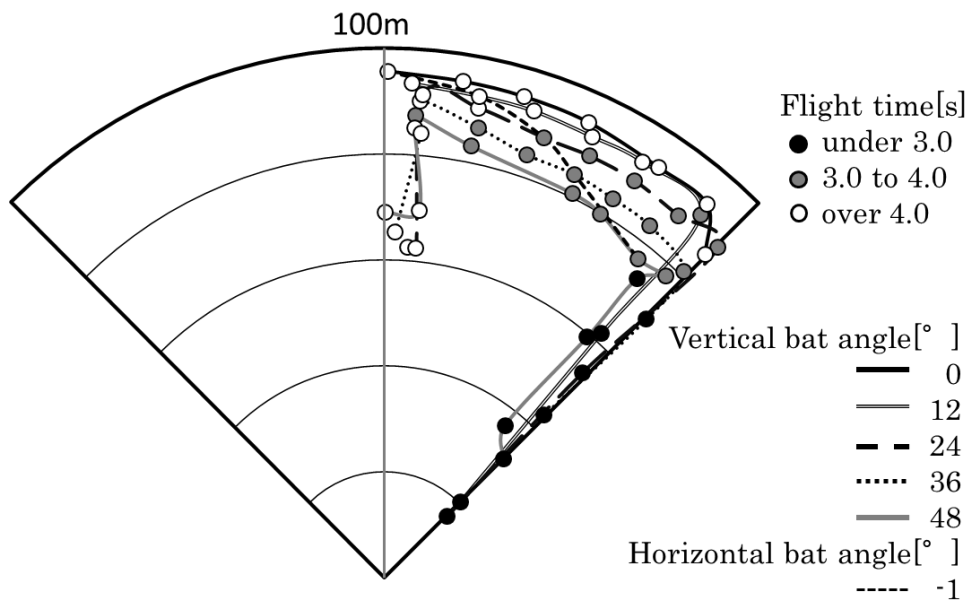
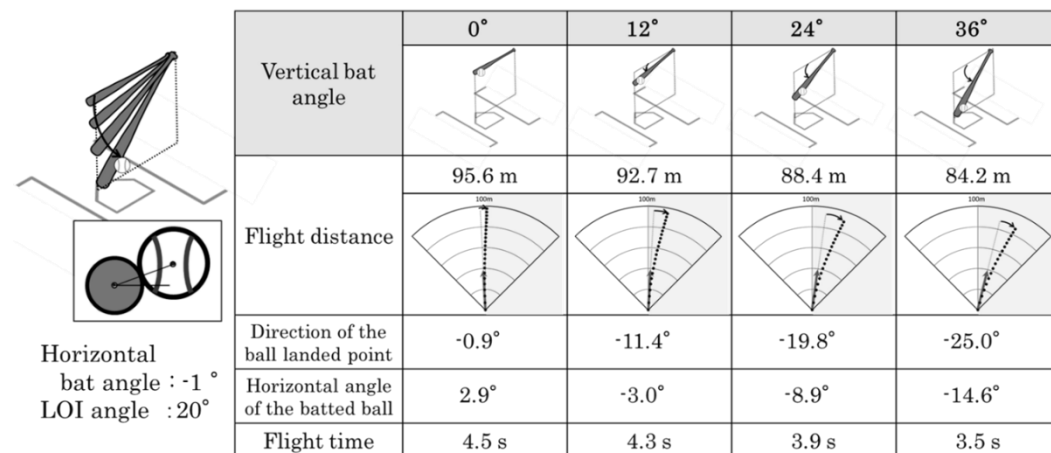


図3-2 飛行時間で色分けしたバットの方位の違いによる打球の落下地点. フェアグラウンド内にバウンドした打球のみに着目するため、バット水平角の範囲はバット鉛直角によって異なった(バット鉛直角 0° の際は $-19\sim-1^\circ$, バット鉛直角 12° の際は $-19\sim-2^\circ$, バット鉛直角 24° の際は $-19\sim-11^\circ$, バット鉛直角 36° の際は $-16\sim-14^\circ$, バット鉛直角 48° の際は $-16\sim-20^\circ$ であった). その際、飛行時間ごとに落下地点を色分けし、同一バット鉛直角については同一色の線をつないだ. 同一色の線で示す同一バット鉛直角での落下地点は、バットの打撃面が右翼を向くものほど右翼線寄りとなる. また、5種のバット鉛直角に関して、バットの打撃面が投球に対してほぼ正対するバット水平角が -1° での落下地点を点線で繋いだ. この点線から右翼側はバットの打撃面が右翼方向、中堅方向側はバットの打撃面が左翼方向を向いていることを表す.

(a) In case of the striking surface of the bat facing toward center field at impact



(b) In case of the striking surface of the bat facing toward right field at impact

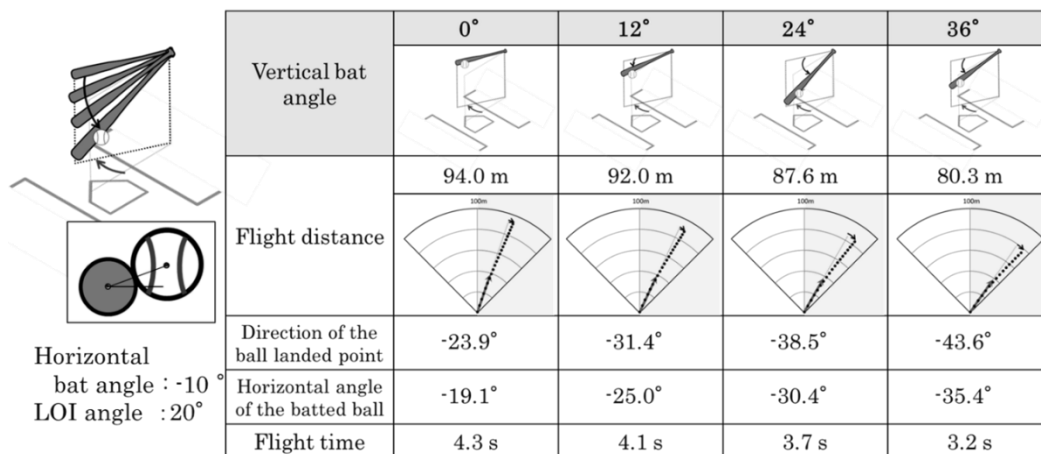


図 3-3 2種のバット水平角（バットの打撃面が投球に対して正対した場合 (a) およびバットの打撃面を 10° 右翼方向に向けた場合 (b)）におけるバット鉛直角の違いによる飛翔特性. 図の矢印はインパクト直後の打球方向の向きを, 点線は飛翔軌道を示している.

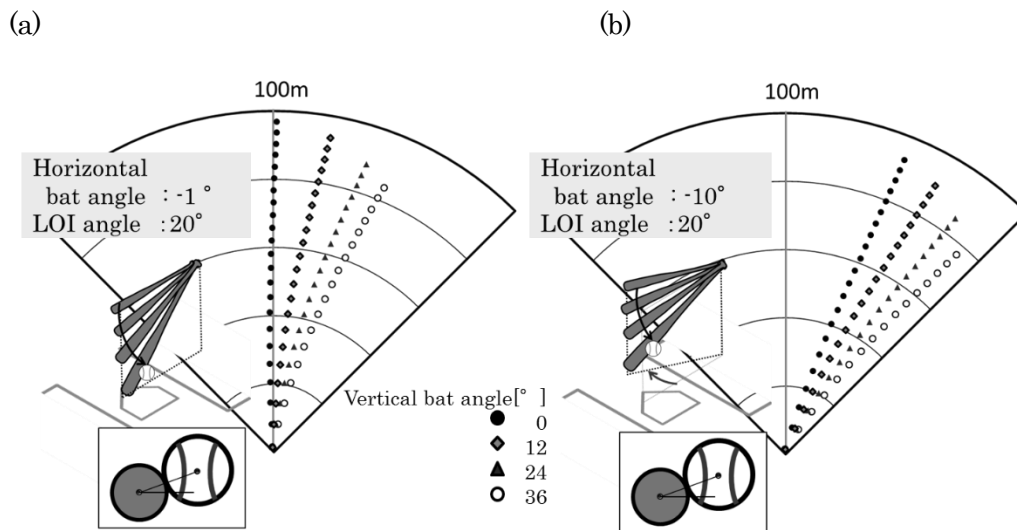


図 3-4 2 種のバット水平角（バットの打撃面が投球に対して正対した場合 (a) およびバットの打撃面を 10°右翼方向に向けた場合 (b)) における一定の衝撃線角度でのバット鉛直角の違いによる飛翔軌道の変化

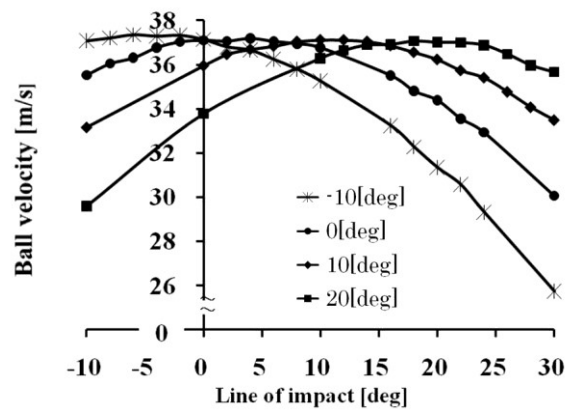


図 3-5 4 種のスイング角度における衝撃線角度の変化による打球速度. 志村ほか (2012) スイング角度およびローリング角速度が打球特性に及ぼす影響 (野球のインパクトシミュレーション). から引用

4. まとめ

有限要素法を用いたインパクトシミュレーションにより算出したインパクト直後の打球特性から飛距離を推定し、指定された方向に流し打ちする際に飛距離を最大化するために最適なバットの方位（水平面・鉛直面での角度）とボールの衝撃位置の組み合わせを明らかにした。さらに、ボールインパクト時のバットの方位が打球特性および飛翔特性に及ぼす影響を検証した。その結果、一般的に「バットヘッドを立て」て、つまりインパクトの瞬間に打者がバットヘッドを大きく低下させずにボールをインパクトするように現場で指導されているが、この「バットヘッドを立て」たスイングで行われた流し打ちは

- ① ボールインパクト時のバット水平角が右翼を向くほどその角度に応じた打球が右翼方向に放たれること
- ② ボールの約 20°下方をインパクトすることにより、大きな飛距離の打球が放たれること

が明らかになった。

一方、バットヘッドをグリップエンドよりも大きく低下させるように傾けたスイングで行われた流し打ちは、バットヘッドが下方を向くほど

- ① 打球の軌道が揚力の影響により右翼線方向にそれるため、飛翔時間は短くなり、飛距離は低下すること
- ② 打球方向が衝撃線角度の小さな変化に対して敏感に反応するため、意図する方向へ流し打ちするには精度の高いバットコントロールが求められる反面、流し打ち方向に打球を放つことを可能にするバット水平角の範囲はバットが下方を向くほど広範囲に及ぶこと
- ③ 大きな飛距離を獲得できるバット水平角と衝撃線角度の範囲が共に狭くなるため、長打を放つためには極めて精度の高いインパクトを行う必要があること

が明らかになった。

第4章 総括論議：野球の実用書に記された『正しい』流し打ち技法の数理的評価

1. 緒言

本学位論文では、弾性体モデルによる3次元インパクトシミュレーションを行い、『流し打ち』において、打球速度および飛距離が最大になる最適なバットの向きとボールインパクト位置の組み合わせを検討した。その結果、以下の知見が得られた。

I. 指定された流し打ち方向に最大の打球速度を獲得するには、バット水平角が意図した打球方向の約60%の角度となるようにインパクト位置を定め、そこではほぼ正面衝突もしくは、ボールのわずかに下部をインパクトできるようにボールを打撃する必要がある【第2章】

II. バットの打撃面を中堅方向に向けてボールを打撃した場合でも、バット鉛直角と衝撃線角度の組み合わせを変化させることにより、水平方向においてフェアグラウンド右半分の方角に打球を打ち出すことができ、ある方向へ打球を打ち出す際のバット鉛直角と衝撃線角度はトレードオフの関係にある【第2章】

III. バットヘッドを立てたスイング（バットヘッドをグリップよりも大きく低下させないでボールをインパクトするスイング）で行われた流し打ちは、ボールインパクト時のバット水平角が右翼を向くほどその角度に応じた打球が右翼方向に放たれ、かつ、ボールの約20°下方をインパクトすることにより、大きな飛距離の打球が放たれる【第3章】

IV. バットヘッドをグリップエンドよりも大きく低下させるように傾けたスイングで行われた流し打ちは、バットヘッドが下方を向くほど、打球の軌道が揚力の影響により右翼線方向にそれるため、飛翔時間は短くなり、飛距離は低下する。【第3章】

これらの知見から、ライナーもしくは飛距離の大きい打球を流し打ちするためには、バットヘッドを立てて、バットの打撃面を流し打ち方向に向けてインパクトすることが共通して重要であることが明らかになった。本研究におけるシミュレーション分析によって明らかになったこれらの知見は流し打ちを『正しく』行うため重要な要素として共通して述べられていた 3 項目 ([1]捕手寄りの位置でボールをインパクトすること, [2]インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向けること, [3]ヘッドをグリップより下げないでスイング・インパクトすること) を支持するものである。その一方で、学術論文では、実測研究やシミュレーションによって上記[1]は概ね支持されているが、[2]と[3]についてはこれに従わなくても流し打ちは可能であることが示された。これら先行研究が導き出した知見は本研究結果によっても支持されており、第 2・3 章では、流し打ちが可能なバット水平角・バット鉛直角・衝撃線角度の組み合わせの範囲にバットの打撃面が中堅方向を向くものやヘッドがグリップよりも大きく低下しているものも含まれることが示された。つまり、本研究結果は、実用書において『正しい』とされる技法を用いることで打球速度と飛距離を最大化できることを示した一方で、ヘッドを下げたスイングをしてもほぼ同等の打球を放つことが可能なことが示されたことになる。両流し打ち技法が合理性をもって並立するにも拘らず、経験豊富な野球選手や指導者が実用書において前者を異口同音に『正しい』技法として位置付けるのはなぜだろうか？現場への応用として、実用書および学術論文で述べられている事実と照らし合わせて理想とする流し打ちを検証する必要がある。

バットヘッドの向きやボールインパクト時のバットとボールの位置関係の違いによって、どのような打球が放たれるかは変わってくるが、その条件の組み合わせは無数に及ぶ。数多くあるパラメータの中から、特に影響を及ぼす因子を抽出することができれば、流し打ちを行う際に気をつけるべき点を絞ることできると考えられる。このような分析には、各関連因子が結果に及ぼす影響度を分析する「感度分析 (sensitivity analysis)」が有用で

ある(福澤・小川, 2016, p.110). 「感度」とは, ある入力値の微小変化に対する出力値の変化量の割合のことであり, 変化の度合いが大きければそれだけその変数の感度が高い, すなわち影響度合いが大きいことを意味する. 感度分析の主な目的は, 結果に最も大きな影響を与える要素が何なのかを判断することと, 各入力値または複数の入力値の変化に対して結果がどの程度の影響を受けるのかを定量化することである. 流し打ちにおける打球方向に及ぼす影響の大きいパラメータ, つまり感度の高いパラメータは, 微小な変化によって打球方向を大きく変化させることから, 最適値に合わせる高度な打撃技術が必要な難易度の高い状況が生じる試技になると思われる. 一方で, 感度の低いパラメータは多少の変動が生じても打球方向への影響は小さいため, 初心者でも比較的低い難易度で最適なバッティングが行えると考えられる. このように, 感度分析は変数が結果に及ぼす影響の大きさを定量的に示す分析ツールであることから, この尺度を用いることで, 現場の経験値と研究による形式知を照らし合わせることができると考えられる. そこで総括論議では, 野球のバッティングにおける流し打ちの実践方法や習得方法について述べられた実用書と流し打ちの打撃技術やメカニズムを分析した学術論文に基づいて流し打ち技法を構成する運動力学的要素の中から精度高く流し打ちを実施するための技術要素を数理的に導き出す.

2. 流し打ち技法を構成する運動力学的要素に関するまとめ

流し打ち技法の中で、特にインパクト時のバットとボールの相対的な位置関係に着目してみると、①バットの打撃面を流し打ち方向へ向けてボールを打撃する方法（第1メカニズム）と、②バットヘッドがグリップエンドよりも低くなるように傾いたバットの上面で、ボールの下部を打撃する方法（第2メカニズム）、及びこれらの組み合わせで流し打ちが実施可能であることが示された。このことは、流し打ちが水平面上（2次元）の斜衝撃メカニズムのみならずバット横断面上の斜衝撃を伴った3次元的なメカニズムとしても説明し得ることを意味する。換言すれば、流し打ちは「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向ける」こと、および、「ヘッドをグリップより過度に下げないでスイング・インパクトする」ことを重要とする実践的知見に基づいた技法とは大きく異なる打撃技術（バットヘッドを過度に下げてボールの下部をインパクトする技法）を用いても実践可能であること、及び実用書では水平面上（2次元）の斜衝撃メカニズムを基盤として構築された流し打ち技法が『正しい』と位置づけられていることが示されたと言える。このように、バットの打撃面を流し打ち方向に向ける流し打ち、および、バットヘッドをグリップエンドよりも低くしてボールの下部を打撃する流し打ちの両流し打ち技法が合理性をもって並立することが明らかになったが、経験豊富な野球選手や指導者が実用書において「ヘッドをグリップより過度に下げないでスイング・インパクトする」必要があることを異口同音に『正しい』技法として位置付ける科学的根拠について検証する必要がある。そこで、バットを大きく下方傾斜して流し打ちを試みると打球方向がバットの打撃面の向きによって規定できず、フライやライナーの場合はより大きく側方へ飛翔する流し打ちに、ゴロの場合はセンター方向寄りや引っ張り方向への打球になるという研究報告より着想を得て、打球方向の安定度を両流し打ち技法で比較することとした。具体的には、打球方向を決定づける力学的重要因子（バットの水平面・鉛直面での角度とボールの短軸方向のインパクト位置）の一つ一つが打球方向に及ぼす影響の度合いを、感度分析の手法を用いて

比較した.

3. 流し打ち技法を構成する技術要素の数理的検証

3.1 分析方法

打球の飛翔方向を決定づける力学的重要因子のそれぞれが打球方向に及ぼす影響の強さを定量化するため、第 3 章で提示した 858 試技分のシミュレーション結果を用いて感度分析を行った。本研究では、偶然誤差によって生じるボールの短軸方向のインパクト位置のズレが打球方向に及ぼす影響の度合いを感度として定量化し、それを様々な下方傾斜角と水平角を組み合わせたバットの向きについて比較した。一定の条件で投げられた投球に対し、インパクト時のバットの位置と角度を表すバット水平角、バット鉛直角、衝撃線角度の 3 つのパラメータのみを系統的に変化させたときの打球の速度（速さ、水平角、鉛直角）をこのモデルで算出し、フェアグラウンドに打球が落下した試技 ($n = 858$) について重回帰式（目的変数：打球方向，説明変数：衝撃線角度，バット鉛直角，バット水平角）で表した。以下に感度分析の手順を示す。

水平面上 (2 次元) の斜衝撃メカニズム (第 1 メカニズム) によって打球方向に影響を及ぼす要因としてバット水平角を、バット横断面上の斜衝撃を伴った 3 次元的なメカニズム (第 2 メカニズム) によって影響を及ぼす要因として、ボールがバットの横断面上のどの位置に衝突したかを示す角度 (衝撃線角度) とインパクト時のバットヘッドの鉛直面上における下向きの傾斜角度 (バット鉛直角) を定義した (図 4-1)。本章では、第 2・3 章とバット水平角および打球方向の向きを逆向き (全て正方向) に定義したが、打球方向が流し打ち方向に大きくなる条件に対して、バット水平角が正方向に作用するというように貢献度として絶対値の大きさを考えられることから問題はないと判断できる。そして、各角度の変動の大きさは同じであっても実質的な発生しやすさは大きく異なることから (衝撃線角度 10° の変動はバットのヘッドの位置を約 5 mm 変動させることによって生じ得るが、バット水平角 10° の変動はバットヘッドの位置を約 150 mm 変動させなければ生じない)、この影響を排除するため、以下の式を用いて各角度を長さとして表される指標に

変換した (図 4-2).

衝撃線角度指標 (x) = (バット半径 + ボール半径) $\times \sin(\Delta$ 衝撃線角度)

鉛直角指標 (y) = バット長 $\times \sin(\Delta$ バット鉛直角)

水平角指標 (z) = バット長 $\times \sin(\Delta$ バット水平角)

(ただし, バット長はグリップエンドからインパクト位置までの距離とした)

上記のように変換した指標 (x, y, z), および各々の自乗項 (x^2, y^2, z^2), さらに各々の 3 通りの積である交互作用項 (xy, yz, zx) の計 9 つを説明変数とする線形結合 (式 (4-1)) として表すため, 重回帰分析を行った. 得られた線形結合を用いて推定した打球方向はシミュレーション出力値として得られた値 ($n=858$) とほぼ一致するような高い相関 ($r=0.9999$) が認められた. また, 推定値をシミュレーション値の関数とする一次回帰式を求めたところ, 回帰直線の傾きが 1.0 となった ($y = 0.9998x + 0.0056$). これより, この線形結合から十分な精度でシミュレーション値を推定できることが確認された. 重回帰分析によってシミュレーション結果が高精度に予測できたのは, ①バットの種類が 1 つに限定されていたこと, ②インパクト時のヘッド速度と角速度を一定にしてシミュレーションが行われたことに起因すると考えられる. また, 精度の検定が実測値との比較ではなく, シミュレーションによる出力値との比較によって行われたことも高い精度が得られた原因の一つと考えられるが, シミュレーションの結果は打撃実験の実測値との間に高い相関 ($r=0.865$) を有し, 回帰式の傾きがほぼ 1.0 ($y=0.9999x-0.00005$) となることが確認されている (第 2 章) ことから, 本研究における重回帰モデルによる算出値も実測値との間で同程度の強い関連が認められるものと考えられる.

$$\beta = f(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + dx + ey + fz + gxy + hyz + izx + j \quad (4-1)$$

($a \sim j$ は係数 (表 4-1))

各変数が打球方向を決定する際に及ぼす影響度を検証するため、式(4-1)を各指標について偏微分(式(4-2))することにより感度(各指標の変動が打球方向に与える影響の大きさ)を求めた。

$$\beta' = f'(x, y, z) = \left(\frac{\partial \beta}{\partial x}, \frac{\partial \beta}{\partial y}, \frac{\partial \beta}{\partial z} \right) \\ = (2ax + d + gy + iz, 2by + e + gx + hz, 2cz + f + hy + ix) \quad (4-2)$$

$\left(\frac{\partial \beta}{\partial x}\right)$ は衝撃線角度の感度, $\left(\frac{\partial \beta}{\partial y}\right)$ はバット鉛直角の感度, $\left(\frac{\partial \beta}{\partial z}\right)$ はバット水平角の感度を表す。これらの感度は打球方向 $\beta[^\circ]$ の単位を[cm]に変換した指標 x, y, z で各々偏微分した値であることから、その単位は $[^\circ/\text{cm}]$ で表される。式(4-2)の指標に任意の値を入力することで、規定された衝撃線角度, バット鉛直角, バット水平角における各指標の感度を算出した。感度は、その値が大きいものほど打球方向に及ぼす影響が大きいこと(つまり感度が高いこと)を意味する。尚、感度を算出すべく任意の指標は、実測で起こりうる範囲内(衝撃線角度は $10\sim 30^\circ$, バット鉛直角は $5\sim 45^\circ$, バット水平角は $0\sim 20^\circ$)で等間隔(10°)となるように設定し、これらの組み合わせ(計45通り= $3\times 5\times 3$)のそれぞれについて打球方向に影響を及ぼす各指標の感度を算出した。

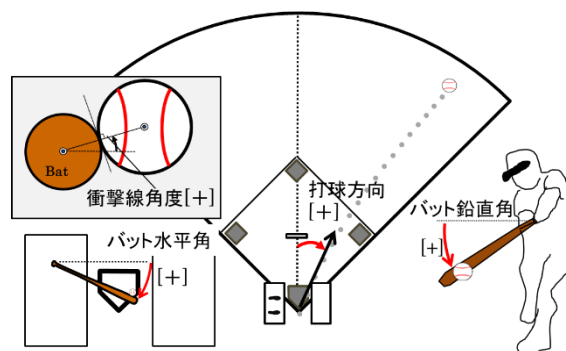


図 4-1 パラメータの向きの定義

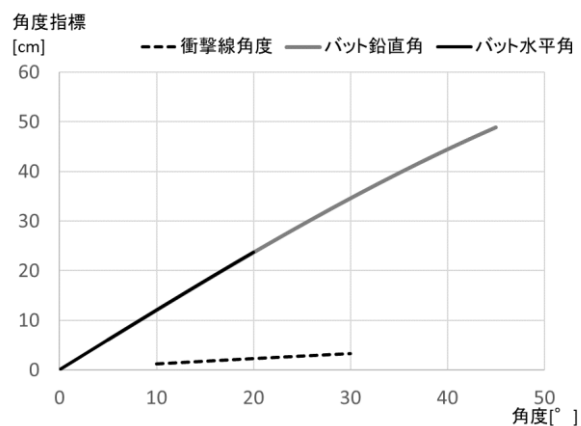


図 4-2 3つの角度とこれらを長さに変換した角度指標の関係

表 4-1 重回帰分析の結果

		係数	標準誤差	t値
(衝撃線角度指標) ²	<i>a</i>	0.6878	0.01500	45.9
(鉛直角指標) ²	<i>b</i>	0.0003	0.00004	5.9
(水平角指標) ²	<i>c</i>	0.0015	0.00011	13.8
衝撃線角度指標	<i>d</i>	-2.5168	0.08500	-29.6
鉛直角指標	<i>e</i>	-0.0083	0.00373	-2.2
水平角指標	<i>f</i>	2.0106	0.00700	287.2
衝撃線 × 鉛直	<i>g</i>	0.1939	0.00091	213.3
鉛直 × 水平	<i>h</i>	-0.0028	0.00008	-33.2
水平 × 衝撃線	<i>i</i>	0.0144	0.00186	7.7
切片	<i>j</i>	-3.7501	0.13418	-27.9

3.2 分析結果および考察

規定した衝撃線角度，バット鉛直角，バット水平角の各組み合わせにおける各指標の感度をバット水平角毎にまとめたグラフを示す(図 4-3a~c)。まず，3つの指標の感度の和に着目する。バット鉛直角が 5° の時，つまりバットをほぼ水平に保った際の流し打ちでは，バット鉛直角が大きい時と比較して衝撃線角度とバット鉛直角それぞれの感度および

3変数の感度の和が低く、ライナー性の打球を放つ衝撃線角度 (10°) の場合はバット水平角の感度が3指標の中で最も高かった。この結果は、バットヘッドをグリップより過度に下げないでライナー性の打球を放つ際の流し打ちにおいて、打球方向を変動させる要因が主にバット水平角にあることに加えて、第2メカニズムの影響は限定的であることを意味する。城所・矢内 (2017a) で流し打ちのゴロでは、とりわけ第1メカニズムの貢献度が高かったと報告されているが、本分析結果から衝撃線角度が小さいライナー性の打球でも同様の傾向があることが確認された。このように、小さいバット鉛直角でインパクトした場合、3変数の感度およびその合計が最も低くなる。そのため、バットヘッドを下げないで行う流し打ちの方がヘッドを下げた流し打ちよりもバットコントロールの不正確さに起因する変動の影響度が小さいことから、比較的正確に意図した方向へ流し打ちができると言える。

次に各指標の感度の高さに着目すると、3つの角度の大きさに関わらずバット水平角の感度はほぼ一定 (約 $2^\circ/\text{cm}$) で、バット鉛直角の感度は最も低い ($<1^\circ/\text{cm}$) ことが分かる。前者の結果は、水平面上でのバット角度の微小な変動が打球方向に及ぼす影響は衝撃線角度やバット鉛直角の大きさに関わらず極めて小さいことを示すものである。後者の結果も、一見するとバット鉛直角が流し打ちにおける打球方向へ与える影響が限定的であることを示すように思われるが、第2メカニズムの影響を勘案すると異なる解釈が導き出される。バット鉛直角が大きい時ほど (つまりバットヘッドが下方に下がるほど) 衝撃線角度の感度が高くなる傾向が図4-3より明瞭に読み取れることから、バット鉛直角の変動は衝撃線角度の感度を変化させ、その結果として間接的に打球方向に影響を及ぼすものと解釈できる。つまり、バットヘッドをグリップエンドよりも過度に下げてスイングした際の流し打ちでは、衝撃線角度の微小の変動が打球方向に及ぼす影響が極めて大きいことを意味する。この結果は、バットヘッドを下げたスイングで流し打ちを行おうとすると、ボールの短軸方向のインパクト位置の微小なズレによって打球は意図した方向から大きく外

れた方向へ飛翔するため、打者が意図する方向へ打球を飛翔させることが極めて困難であることを示すものである。したがって、第2メカニズムを基盤とした打撃技術を用いて意図した方向へ流し打ちをするには精度の高いバットコントロールが求められる。

以上の感度分析より、①「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向け」、
「ヘッドをグリップより過度に下げないでスイング・インパクトする」ことを重要とする実践的知見に基づいた技法を用いるとボールの短軸方向のインパクト位置の微小な変動に起因する打球方向の変動は小さく、打球はほぼ意図した方向へ放たれることが明らかになった。一方で、②バットヘッドを大きく下げてボールの下部をインパクトする技法を用いると、ボール短軸方向のインパクト位置の微小な変動によって打球は意図した方向から大きく外れた方向へ飛翔することが示された。この結果は、実用書に記された『正しい』流し打ち技法の方が人的過誤の影響が小さく、安定して意図した方向へ打球を放つことを可能とする技法であることを示すものである。したがって、より精度高く比較的容易に意図した方向へ打球を放つための最適な技法は実用書で『正しい』とされる流し打ち技法であると結論付けられる。

この結果に対する現場への応用として、指導現場では、ピッチャーにとって「アウトコース低めは生命線」と言われるように、アウトコース低めに投げられるか否かが重要視されている（全国野球技術研究会編，2013 a, p.59）理由を科学的に検証する。打者は、アウトコースに投げられたボールについては、捕手寄りでインパクトしやすい（城所・矢内，2017b）。また、アウトコースのボールを捕手寄りの位置でインパクトする際、バットの打撃面は右翼方向を向きやすい（第3章）ことから、アウトコースは流し打ちしやすいコースであると言える。その際に、ボールの高低について考えると、打者は高めのボールを狙う場合には、①のように、「インパクト時にバットの打撃面を流し打ち方向に向け」、
「ヘッドをグリップより過度に下げないでスイング・インパクトする」ことで比較的容易に流し打ちを行うことができる。一方アウトコース低目を打つ場合には、バットヘッドを

下げなければならない状況が生じる。この場合には、②のようにボールの数ミリ上もしくは下を叩くことによる微小なインパクトのズレが打球方向に及ぼす影響が大きくなる。さらにインパクトポイントも目から遠い位置にあることから、正確なバットコントロールができる打撃技術の高い打者でなければ、最適なインパクトポイントで打撃することは難しい。このように、投手が打者を抑えるためには、打者が正確に打球を捉えることが困難なアウトコース低めに投球することが重要であることが本研究結果から示された。

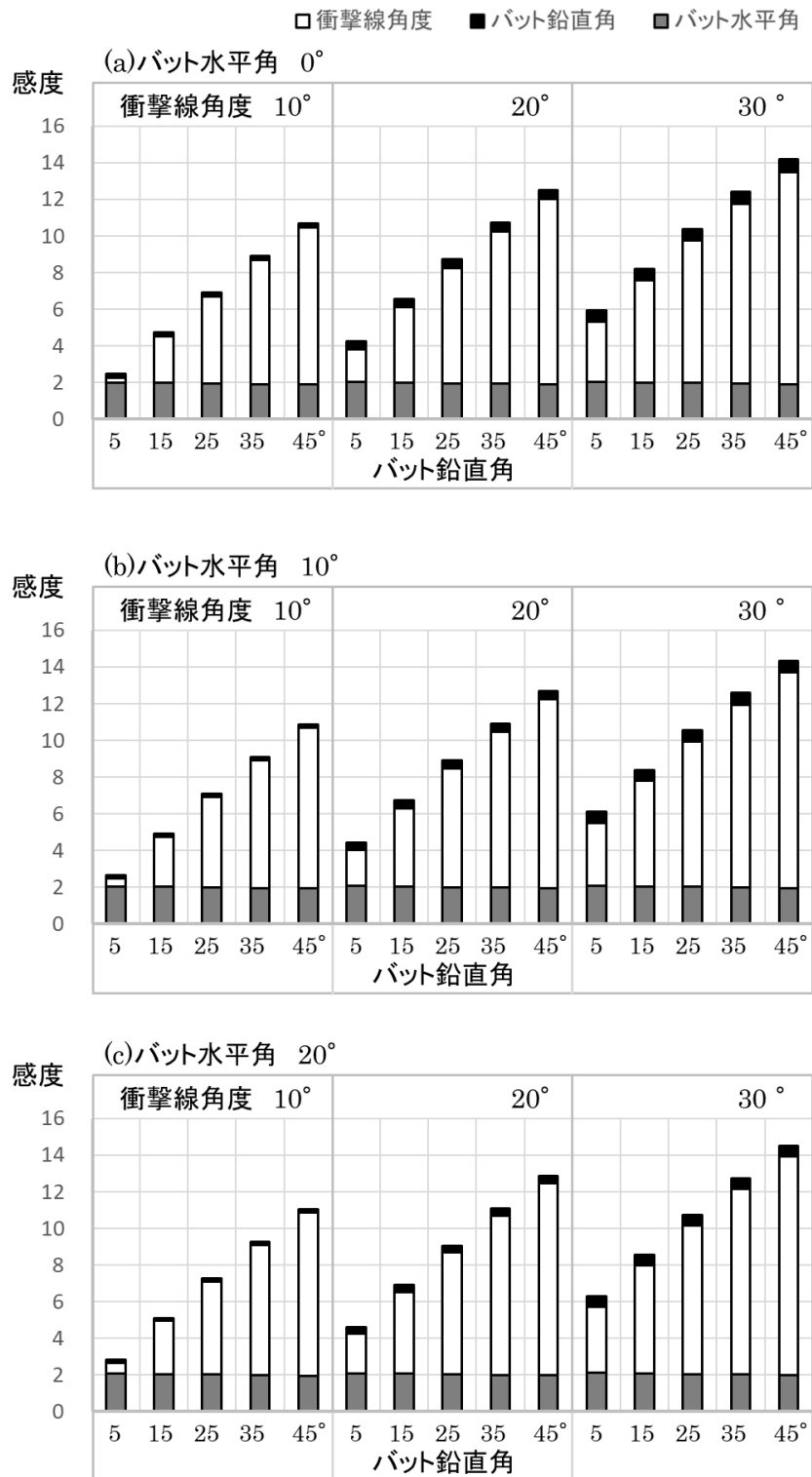


図 4-3 バット水平角の違いによる打球方向に影響を及ぼす変数の感度 [%/cm]

4. 結論

本学位論文では、流し打ちにおいて「狙った方向に精度高く勢いのあるライナーまたは飛距離の大きい打球を放つためのインパクト技術」をメインテーマとして研究を行った。その結果、本研究の 2 つのシミュレーション研究によって、打球速度、並びに打球飛距離を最大化するためにはバットヘッドを極端に下方に下げないでインパクトするという実用書に記された『正しい』流し打ち技法が支持された一方で、ヘッドを下げたスイングでも、ほぼ同等の打球を放つことが可能なことが示された。このようにバットの打撃面を流し打ち方向に向ける流し打ち、および、バットヘッドをグリップエンドよりも低くしてボールの下部を打撃する流し打ちの両流し打ち技法が合理性をもって並立するにも拘らず、経験豊富な野球選手や指導者が実用書において前者を異口同音に『正しい』技法として位置付けていた。これは、実用書に記された『正しい』流し打ち技法の方が人的過誤の影響が小さく、安定して意図した方向へ打球を放つことを可能とする技法であったことが理由としてあげられる。以上より、打球速度、打球飛距離、安定性の全てにおいて実用書に記された『正しい』流し打ち技法ならびに経験値の方が優れていることから、これを広く推奨・指導することは数理的に妥当であると結論付ける。

補足 本文中で使用した野球用語の説明

カウント	試合の状況を数字で表したもの。アウトカウントとボールカウントの2種類がある。
送りバント	バントをしてランナーを次の塁に進めること
ヒットエンドラン	投球と同時にランナーがスタートし、バッターが打つプレー
グリップエンド	バットの握る部分の一番下
内野安打	内野手の守備範囲だが、内野手のエラーがなくてもアウトにできなかったヒットのこと
スクイズ	ランナーが三塁にいるときに、打者がバントをし三塁ランナーがホームインすること
三遊間	三塁手と遊撃手との間
打率を残す	高打率の成績を残す
逆方向に打つ	流し打ちをする
中堅	野球で、外野の中央
右中間	右翼手と中堅手の守備範囲の中間
長打	野球で、二塁打・三塁打・本塁打をいう
手首を立て、ヘッドの利いた状態	両手部を上下に並べ、ヘッドを高い位置に維持する状態
フェアグラウンド	ファウルラインの線上および内側の地域
タッチアップ	ランナーがフライが捕球された直後に、ベースをけて進塁すること
テイクバック	スイングで、反動をつけるために腕を後ろに引く動作
ファウルフライ	ファウルグラウンド上に打ち上げられた打球

参考文献

- 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 Skills 編著 (2007) メジャーVS 日本 野球最強のバッティングフォーム. 西東社, p.15, p.116, pp.154-155.
- ベアー. F. P. and ジョンストン. E. R. (1998) 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.
- Crisco, J. J., Greenwald, R. M., Blume, J. D. and Penna, L. H. (2002) Batting performance of wood and metal baseball bats. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 : 1675-1684.
- Cross, R. and Nathan, A. M. (2006) Scattering of a baseball by a bat. *American Journal of Physics*, 74 (10) : 896-904.
- 江藤省三 (2008) 実戦に強くなる 野球絶対上達. 実業之日本社, p.54.
- 江藤省三 (2011) 江藤省三の野球教室：野球が上手くなる Q&A100. 東京新聞, p.116.
- Fleisig, G. S., Zheng, N., Stodden, D. F., and Andrews, J. R. (2002) Relationship between bat mass properties and bat velocity. *Sports Engineering*, 5 (1) : 1-8.
- ハンク アーロン (2011) ハンク・アーロンのホームラン・バイブル. 池田郁雄訳, 王貞治監修, ベースボールマガジン社, p.13, pp.26-27.
- 福澤英弘・小川康 (2016) 不確実性分析実践講座：ケースで学ぶ意思決定の手法. ネクスプレス, p.110.
- 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, p.90.
- Gelinas, M. and Hoshizaki, T. B. (1988) Kinematic characteristics of opposite-field hitting. *Biomechanics in Sports VI. Proceedings of the 6th International*

Symposium on Biomechanics in Sports, 519-530.

Hay, J. G. (1978) The biomechanics of sports techniques (2nd ed.). Prentice-Hall.

Higuchi, T., Nagami, T., Morohoshi, J., Nakata, H., and Kanosue, K. (2013) Disturbance in hitting accuracy by professional and collegiate baseball players due to intentional change of target position. *Perceptual & Motor Skills: Exercise & Sport*, 116 (2) : 627-639.

本間正夫 (2007) 少年野球「バッティング」のすべて この1冊で打率が上がる 飛距離がのびる 主婦の友ベスト BOOKS. 主婦の友社, p.62.

Hester, L and Koenig, K. (1993) Performance measurements of baseball bats. *Journal of the Mississippi Academy of Science*, 38 : 7-10.

井端弘和 (2013) 勝負強さ (角川 one テーマ 21). 角川書店, p.116.

Jezoriek, A. and Moura, S. (2004) Motions of baseballs and footballs. *Mechanical Engineering*, 170.

金堀哲也・谷川聡・島田一志・内藤景・川村卓 (2017) 大学野球におけるレギュラー打者と非レギュラー打者のインパクトパラメーターに関する事例的研究～マシン打撃における試技結果および投射コースの比較から～. *コーチング学研究*, 30 (2) : 167-178.

神田芳文・鳴尾丈司 (2007) 軟式野球ボールとバットの衝突シミュレーション. *日本機械学会論文集, C編 73 (729) : 1307-1313.*

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 (2014) バッティングの科学 理想のスイングを極める. 洋泉社, p.67, p.122.

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.
- 菊池壮光 (2016) 野球 守備フォーメーション. 成美堂出版, pp.26-29.
- King, K., Hough, J., McGinnis, R., and Perkins, N.C. (2012) A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. *Sports Engineering*, 15 (1) : 41-52.
- Kirkpatrick, P. (1963) Batting the ball. *American Journal of Physics*, 31 (8) : 606-613.
- 小早川毅彦 (2007) 小早川毅彦の「インコース&アウトコースを打つコツ」教えます. ベースボール・マガジン社編, *バッティング バイブル [テクニク編]*. ベースボール・マガジン社, pp.78-81.
- 前田智徳 (監修), 高岩ヨシヒロ (2015) 野球教室 (マンガでマスター). ベースボール・マガジン社編, ポプラ社, pp.202-205.
- McBeath, M. K., Nathan, A. M., Bahill, A. T., and Baldwin, D. G. (2008) Paradoxical pop-ups : Why are they difficult to catch? *American Journal of Physics*, 76 (8) : 723-729.
- McIntyre, D. R. and Pfautsch, E. W. (1982) 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.
- Meyer, E. R. and Bohn, J. L. (2008) Influence of a humidior on the aerodynamics of baseballs. *American Journal of Physics*, 76 (11) : 1015-1021.
- 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.
- 宮澤隆・志村芽衣・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イ

- ンパクトシミュレーション. 日本機械学会論文集, A77 (777) : 813-822.
- 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・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・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.
- 元木大介 (2008) 野球少年必見 打撃上達パーフェクトマニュアル. ベースボールマガジン社, p.40.
- 村田厚生 (1998) 野球のスイング時のバットのヘッドスピードに及ぼす要因の検討. 人間工学, 34 (3) : 151-155.
- Nicholls, R. L., Miller, K., and Elliott, B. C. (2006) Numerical analysis of maximal bat performance in baseball. *Journal of Biomechanics* 39 : 1001-1009.
- 尾田十八・酒井忍・米村茂・河田憲吾 (2004) 野球ボールの衝撃力測定とシミュレーション解析. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集, 100-103.
- 佐相眞澄 (2017) 神奈川で打ち勝つ 超攻撃的バッティング論. 竹書房, p.96, p.117.
- Sawicki, G. S., Hubbard, M., and Strong, 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.
- 齋藤正直 (2011) 野球ステップアップシリーズ バッティング編. ベースボールマガジン社, p.135.
- 成美堂出版編集部 (2005) 野球が突然うまくなる奇跡のバッティング術—コンピュータ解析による打撃論・技術論. 成美堂出版, p.42, p.73.
- Shenoy, M. M., Smith, L. V. and Axtell, J. T. (2001) Performance assessment of wood,

metal and composite baseball bats. *Composite Structures*, 52 : 397-404.

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 (2002) プロが教えるバッティング入門 : プロの技, 駆け引き, 戦術を伝授. 大泉書店, p.104, p.109, p.127.-

篠塚和典 (2013) 流し打ちの極意. ベースボールマガジン社, pp.54-55, p.81-82, p.84, pp.122-123.

篠塚和典 (2014) 至高の流し打ち論. プロ野球バッティングバイブル : 剛柔自在のスイングが身につく. ベースボールマガジン社, p.94, p.97.

Smith, L. V. (2001) Evaluating baseball bat performance. *Sports Engineering*, 4 : 205-214.

角晃司 (2001) 野球上達 book バッティング. 成美堂出版, p.187.

Tabuchi, N., Matsuo, T. and Hashizume, K. (2007) Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. *Sports Biomechanics / International society of biomechanics in sports*, 6 (1) : 17-30.

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.

立浪和義 (2011) 立浪和義超打撃術. ベースボールマガジン社, pp.46-48, p.51.

テッド ウィリアムズ・ジョン アンダーウッド (2000) テッド・ウィリアムズの本格的バッティングの科学. 池田郁雄訳, ベースボールマガジン社 ; 新装版, pp.50-51, p.102.

得津高宏 (2009) 試合で大活躍できる バッティング上達のコツ 50. メイツ出版, p.59, p.76, p.112.

若林健一・篠田秀美・佐伯勉・川端理香 (2006) 150 キロのボールを打つ. ナツメ社,
pp.110-111.

山本清春 (2000) 野球バッティング：技術とパワーアップ練習法. 西東社, pp.124-126.
p.129.

全国野球技術研究会編 (2013a) 打者を追い込む投球術がよくわかる 野球 配球の極意.
実業之日本社, p.59.

全国野球技術研究会編 (2013b) 野球攻撃・走塁事典：戦略的なバッティングと走塁術が
よくわかる. 実業之日本社, p.134.

全国野球振興会編 (2003) 野球指導書：for the dreams of boys and girls. 全国野球振興
会, pp.164-165.

謝辞

本学位論文は、早稲田大学スポーツ科学学術院 矢内利政教授の指導のもとに行われました。矢内先生には、大学院修士課程から熱心なご指導を頂きました。さらに修了後も招聘研究員として研究に携わる機会をつくっていただき、仕事をしながらも研究を続けることができたのは矢内先生のおかげです。長期にわたり、ご指導いただけたことを大変感謝しております。

副査として本学位論文の審査を引き受けてくださった早稲田大学スポーツ科学学術院 彼末一之教授、菅田雅彰教授、ならびに福岡ソフトバンクホークス チーム戦略室 R&D 担当 城所収二さんに感謝申し上げます。公開審査会での質問やご指摘は、本論文を発展させる上で大変有意義なものとなりました。

宮澤隆さんにも、シミュレーションモデルの作成から分析やデータ解釈まであらゆる面でアドバイスしていただき、大変お世話になりました。シミュレーション研究を行う上で、元となる実測実験の研究を行っていた城所収二さんには、実測データの解釈からシミュレーションモデルの妥当性検証にあたり大変お世話になりました。同じバイオメカニクス研究、野球グループとして、野球ミーティングでの発表で様々なアドバイスをいただいた研究室の方々にも大変お世話になりました。私が研究を続けてこれたのも、修士課程での研究室の仲間や研究員時代の野球研究グループの皆様のおかげです。深く感謝いたします。

そして、最後に、仕事をしながら、研究を続けることを支援し温かく見守ってくれた私の家族に心より感謝いたします。

2021年1月 志村 芽衣