

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

野球の打撃に求められるインパクト技術

The impact techniques of baseball batting
in collegiate players and its implications
to performance improvement

2014年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

城所 収二

KIDOKORO, Shuji

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	3
第2章	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	
1.	諸言	5 6
2.	方法	5 9
3.	結果と考察	6 6
4.	まとめ	7 7
第3章	打球の運動エネルギーを決定するスイングとインパクト	
1.	諸言	7 8
2.	方法	8 1
3.	結果と考察	8 9
4.	まとめ	1 0 3
第4章	『流し打ち』の打球方向とインパクトの関係	
第1節	流し打ち動作における打球方向を決定するインパクト特性	
1.	諸言	1 0 5
2.	方法	1 0 7
3.	結果	1 1 2
4.	考察	1 1 4
5.	まとめ	1 2 1
第2節	流し打ちを可能にする2つのインパクトメカニズム：各メカニズムの貢献度	

1. 諸言	1 2 2
2. 方法	1 2 4
3. 結果	1 3 3
4. 考察	1 3 8
5. まとめ	1 4 1
第5章 総括論議	1 4 2
1. プロ・社会人を含めた熟練した野球選手への一般化	1 4 4
2. 現場への応用	1 5 6
第6章 結論	1 6 6
参考文献	1 6 7

第1章 緒論

1. 序

近年、野球・テニス・卓球などの競技において世界を舞台に活躍する日本人選手が増加している。これらのスポーツは、打具を用いて対象となるボールに衝撃を与える『打つ動作』が不可欠であり、この技能の優劣が試合の行方を大きく左右する。特に上記のスポーツは、高速移動するボールを『強く』かつ『正確』に打ち返さなければならないため、時間的・空間的制約の強い高度な技術が要求される。Kirkpatrick (1963) は、野球の打撃においてボールインパクト時のバットの状態は、位置や方位、運動量や時間からなる 13 の要素によって定義され、全要素について正負の方向に対するエラーを合わせると、打者には 26 通りの失敗のパターンがあることを述べている。各要素の打撃に与える重要性はそれぞれ異なるものの、いずれか一つでも打者がコントロールを誤った場合、打撃が失敗に終わるだろうと述べており、ヒットやホームランを放つことがいかに難しいかがわかる。すなわち、超一流とされる日本人選手が世界で活躍する背景には訓練と経験に裏打ちされた『高い打撃技術』が存在し、いかにしてこの技術を高められるかが、今後日本人選手が『打つ動作』を伴うスポーツ競技で世界のトップに立つかどうかの決め手となろう。

「野球選手は、絶えず応用物理学の実践者である (Watts and Bahill 1990)」とされるように、ボールとバットの衝突は力学の原理に則った現象を生ずる。すなわち、打球の指標となる各要素 (スピード・回転・発射される方向) は、衝突直前のバットのスピードとその方向 (スイング特性) と、衝突した瞬間のバットの方位とボールの衝突位置 (インパクト位置) によって、そのほとんどが決定される。しかし、これらの関係を検討した過去の研究は、バットの構造やボールの反発といった道具の観点からみた衝突特性や (Smith 2001, Cross and Nathan 2006)、運動量保存則やエネルギー保存則といった力学原理の制

約の中で、最も妥当と考えられるモデルを用いた数値シミュレーションによって行われている (Watts and Baroni 1989, Sawicki et al. 2003, Nichols et al. 2006). このため、『高い打撃技術』を裏付ける選手個々の特徴が反映されておらず、各選手の技術向上を図るための具体的方策を導くことが困難である.

また、野球のバッティングには『流し打ち』や『引っ張り』といった打球を左右方向へ打ち分ける打撃技術が存在し、打者はヒットエンドランや進塁打などの場面でこの打ち分け技術が要求される. とりわけ流し打ちは、インパクトのタイミングを意図的に遅らせるといった高度な技能が必要と考えられているため、選手間差が大きい打撃技術である. 流し打ちはバットの打撃面をライト側 (右打者の場合を想定) へ向けてボールをインパクトする打撃技術と考えられており、McIntyre and Pfautsch (1982) は頭上から打撃フォームを撮影した結果、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ライト側へ向いていたことを報告している. この現象は、これまでインパクトの瞬間におけるバットのライト側への傾斜が、投球に対して入射角を生じさせ、その反射角によって流し打ち方向に打球が放たれるものとして説明されてきた. しかしながら、これらは水平面上での運動として捉えられており、3次元的な運動であるバットスイングにおいても上記の説明が立証されるかは疑問である.

以上のことから、本学位論文では、①『打球飛距離』と打球の痛烈さの指標となる『打球の運動エネルギー』に影響を与えるスイングの特徴、②『スイングの速度』と『インパクトの正確さ』のどちらが打球の運動エネルギーを決める上で重要な要因となるのか、さらに、③『流し打ち』動作がどのようなインパクトによってなされているのかを3次元的なバットの振る舞いとして調査し、熟練した野球選手の打撃技術の特徴を明らかにすることを目的とした.

2. 研究小史

2.1 はじめに

野球の打撃において、打者を評価するための指標には打率や本塁打数、打点、近年では出塁率と長打率を足し合わせた OPS (On-base plus slugging) など様々な項目が存在する。打者の特徴によっても目指すべき指標が異なるものの、総じて高い確率で痛烈な打球を放つことが重要である。それでは、痛烈な打球とはいかにして放たれるのだろうか？スイング速度を高め、バットの芯でボールを捉えるべきことは予測できるものの、軽いバットを使ってスイング速度を高めることが打球速度に対して有利に働くのか、そしてバットの芯とは何を指し、どこに位置するのかなどといった疑問が生じる。これらの疑問を解決するには、ボールインパクトを物理現象として捉えることが有効である。

ボールインパクトは、その本質を物理学の既知の法則から理解することができる。このため、スポーツに関連するボールインパクトの研究は、物理学者や工学者を中心に数多く行われてきた。一旦そのメカニズムが理解されれば、少なくとも管理された条件下では、インパクトに伴うボールやバットの振る舞いを予測することが可能となる。一方、彼らの研究の多くは、インパクトのメカニズムを明らかにすることや、バットの性能を評価することを目的としており、スポーツパフォーマンスに関する言及を控えている。しかしながら、これらの基礎研究は、スポーツパフォーマンスに結びつける研究のツールとなるため、スポーツ科学の分野においても非常に有用なものとなる。

実際の打撃を正確に解釈するためには、ボールインパクトを 3次元で捉える必要があるが、極めて複雑なため本小史ではボールインパクトを、4つのパートに分類して考えることとする。それぞれ、①ボールに作用する力や変形、反発係数といったボールを主体とした1次元的なインパクト、②並進運動のみで捉えるボールとバットの1次元的な正面衝突、

③バットの回転運動を伴う 2 次元平面上でのボールインパクト, ④衝撃を加えた方向とボールの反発する方向が一致しない斜め衝突である (図 1-1). 上記について, 物理学としての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データを元に, これまでに明らかにされた事柄をまとめていく.

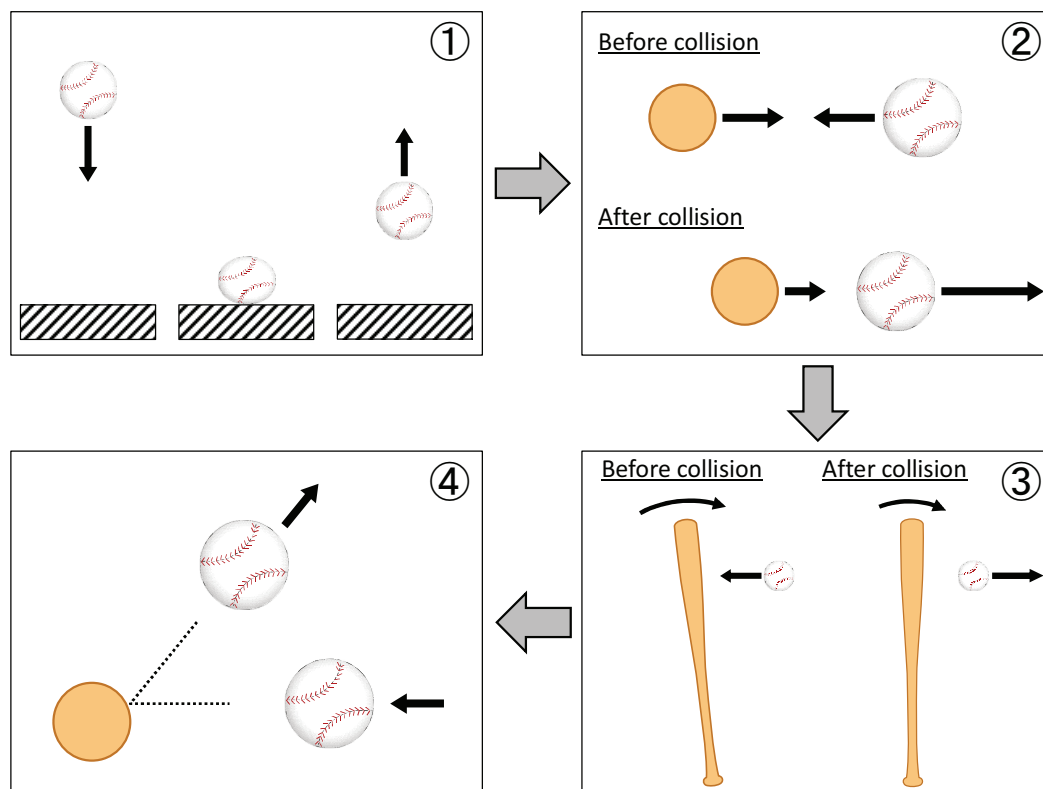


図 1-1 4 種類に分類したインパクトモデル. ①ボールのみの力学的特性, ②ボールとバットの 1 次元的な正面衝突, ③ボールとバットの 2 次元平面での正面衝突, ④ボールの斜め衝突.

2.2 ボールの弾み方

まず、ボールが他の物体に衝突した際にどれだけの力が作用し、その力によってどれだけの反発がもたらされるのかについて考えていく。ボールのみの特性を導くために、質量 m のボールが、一定の高さから大理石のようなボールに比べて質量が十分に大きく堅い床の上に落下した際の衝突を仮定する。ボールを最も単純なモデルとする質量を有するバネとして捉えた場合、ボールは床に衝突すると同時に変形を開始し、床はフックの法則によりボールへ近似的に力 $F = kx$ を作用させる (Bayman 1976, Cross 1999b)。ここで、 k はボールのバネ定数であり、 x はボールの圧縮量である。ボールの圧縮量と質量中心の衝突後の変位を同等として扱う場合 (図 1-2)、ボール質量中心の運動方程式は $F = kx = -m d^2x/dt^2$ によって与えられる。

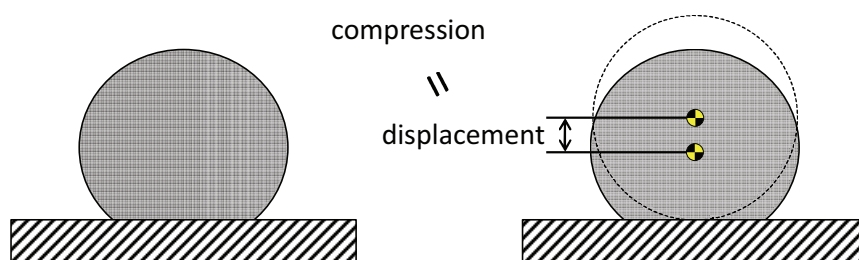


図 1-2 ボールが変形した際の圧縮量と、質量中心の変位量。変形時の振る舞いは、実際にはボールが中実あるいは中空(肉厚の程度を含む)であるかどうか、また曲げ剛性の高さなどに依存する (Stronge and Ashcroft 2007)。

バネ定数を衝突の間に変化しないものと仮定するならば、ボールの圧縮量 (x) は単振動の一般解を用いて次式のように表される。

$$x(t) = x_{max} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (1)$$

ここで、 x_{max} は振幅に相当するボールが最も圧縮した時の自然長からの変化量であり、 ω は角周波数、 t は時刻である。また、初期位相 (θ_0) が 0 であることから、ボールの圧縮量

(x) と圧縮速度 (v) は、次式によって表される.

$$x(t) = x_{max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt}(t) = x_{max} \omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

インパクトした瞬間の圧縮速度 (v_0) は $v_0 = \omega x_{max}$ であることから、ボールの圧縮速度 (v) は次のように書き換えられる.

$$v(t) = v_0 \cos(\omega t) \quad (4)$$

角周波数 (ω) は、バネ定数 (k) が一定の場合に $\omega = \sqrt{k/m}$ で表されることから、インパクトした瞬間のボール圧縮速度 (v_0) は、次式によって表される.

$$v_0 = x_{max} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

ゆえに、ボールの最圧縮量 (x_{max}) を決定する式は次のように表される.

$$x_{max} = v_0 \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (6)$$

以上より、ボールに作用する力の最大値 (F_{max}) は、式 (7) によって表される.

$$F_{max} = kx_{max} = v_0 \sqrt{km} \quad (7)$$

また、ボールの接触時間 (T) は、単振動の 2 分の 1 周期となるため、次のよう示される (Cross 1999c).

$$T = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (8)$$

力の最大値 (F_{max}) は衝突速度 (v_0) に正比例し、バネ定数 (k) と質量 (m) の増加にともなって増大する. 一方で、接触時間 (T) は質量 (m) に伴って増加し、ボールのバネ定数 (k) が増加するとともに減少する. 従って、一般的に堅い物体同士の衝突では、力の最大値が大きいことやインパクト時間が短いことが特徴である. 実際、野球やソフトボールのような比較的堅いボールを、バットなどの堅い素材に衝突させたときの接触時間は短く、

0.6~2.2ms である (Handee et al. 1998, Cross 1999b, Nathan 2000, Adair 2001, Nicholls et al. 2005b, Nicholls et al. 2006, Smith et al. 2010, Burbank and Smith 2012). 衝撃力は衝突速度に依存する一方で, 式 (8) のようなバネ定数が一定のモデルの場合, 接触時間は主に 2 つの衝突する物体の質量とバネ定数によって決定される. この際, ボールに作用する力 (F) は, 重力 (mg) よりも 100-1000 倍大きく (Cross 1999b, Cross 1999c), 通常ボールに作用する重力は無視される (Garwin 1969).

バネ定数 (k) は, 前述したようなボールの質量 (m) と接触時間 (T) を測定することにより評価できるが, 材料試験機械を利用してボールを 10 秒以上費やして圧縮させる準静的な手法を用いることによっても評価できる (Kirkpatrick 1963, Handee et al. 1998, Cross 1999b, Nicholls et al. 2005b). しかしながら, 準静的な圧縮中の応力緩和 (stress relaxation : 一定の圧縮量でボールに作用していた応力が時間とともに低下すること) がボールを圧縮するのに必要な力を低下させるように作用する (Cross 2011). このため, 材料試験機械を用いた場合にはバネ定数を過小評価することが指摘されている (Handee et al. 1998, Smith et al. 2010). 力の時間に関する 2 回積分は, ボールの圧縮よりもむしろ質量中心の変位を与えるが, 2 つは密接に関連付けられる. 従って, ボールがフォースプレートから弾む場合, バネ定数はボールに作用する力を測定することで評価される.

重い平板にボールを低速度で正面衝突させた際に作用した力と変形量の関係を図 1-3 に示す. 圧縮中のボールは, 入射速度にかかわらず全ての場合で同じ力 - 変位曲線の軌跡をたどるが, 復元期の曲線は異なる経路をたどることがわかる. また, 図 1-3 のような非線形の力 - 変位曲線は, ある瞬間における力と変形量の比 (F/x) が F に応じて変化するため, 一定のバネ定数を導出しない. このため, 最大圧縮時に作用した力から平均のバネ定数を導出する準静的バネ定数 (quasi-static stiffness) に対し, 変形量に伴った力の増加傾

向を記述するための曲線の傾き (dF/dx) は、各ポイントにおける動バネ定数 (dynamic stiffness) として一般的に定義されている (Handee et al. 1998, Cross 1999a, Cross 1999b, Nathan 2000, Smith et al. 2010, Nathan et al. 2012a).

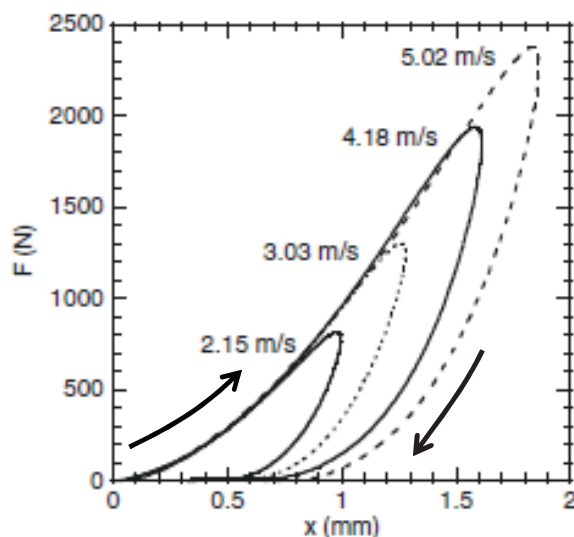


図 1-3 4 種類の投射速度 (低速) で圧電性ディスクに野球ボールを投射させた際の力 - 変位曲線. Cross (2011) より引用.

一方で、高速な衝突によって測定されたバネ定数は、準静的な圧縮測定や低速衝突に比べて数倍大きくなることが報告されている (Handee et al. 1998, Cross 1999a, Cross 1999b, Cross 2008, Smith 2010, Cross 2011). 従って、低速衝突による測定の場合、ボールの種類を変えてボールのバネ定数を相対的に評価することには適しているものの、そのスポーツで起こり得る速度でのバネ定数そのものを定量、評価することには適していないと考えられる. その他、平板への衝突か、バットに作用する力を再現させるようなシリンダー状の曲面に対する衝突かどうかによっても、ボールの歪みに差が生じるために作用する力にはわずかに差が生まれることや (Smith and Duris 2009, Burbank and Smith 2012), 野球ではないもののクリケットボールにおいて、接触面とボールの縫い目が一致

するかどうかによっても作用する力が異なることが報告されている (Carre et al. 2004).

前述したように、ボールの圧縮量と作用力の関係は直線的ではないため、バネ定数 (k) を一定と仮定した線形ばねモデルを用いることができない。そこで、非線形のばねモデルを用いることで、圧縮局面と復元局面における応力 (F) と圧縮量 (x) の関係は、指数関数を利用した式により近似される (Barnes 1958a, Leroy 1985, Nathan 2000, Smith et al. 2010).

$$\text{圧縮 : } F(x) = k_1 x^n \qquad \text{復元 : } F(x) = k_2 x^p \qquad (9)$$

指数関数によって示される曲線は、対数表記にすることで直線的に近似できる利点があるため、しばしば対数軸で表記される (Cross 1999b, Cross 2011)。そして、式 (9) における F の値を、ボールが最も圧縮した (x_{max}) 時に作用した力とすると、両者の値は等しくなる。これより、両者は次式のように組み合わせられる。

$$\begin{aligned} k_1 x^n &= k_2 x^p \\ x &= \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{\frac{1}{n-p}} \end{aligned} \qquad (10)$$

力 - 変位曲線の圧縮局面における曲線より下側の面積は、ボールを圧縮する際にした仕事 ($U_{comp.}$) であり、復元局面における曲線の下側の面積は、ボールを復元する際にした仕事 ($U_{rest.}$) を示す。従って、両者の仕事の差となるヒステリシス曲線によって囲まれた面積は、ボールの中で消費されたエネルギーとして表すことができ (Handee et al. 1998, Adair 2002, Cross 2011), 次の手順で算出される。まず、圧縮時にボールにした仕事 ($U_{comp.}$) は、次のように算出される。

$$\begin{aligned} U_{comp.} &= \int_0^{x_{max}} k_1 x^n dx \\ U_{comp.} &= k_1 \left[\frac{x^{n+1}}{n+1} \right]_0^{x_{max}} \end{aligned}$$

$$U_{comp.} = k_1 \frac{x_{max}^{n+1}}{n+1} \quad (11)$$

同様に、復元時にボールにした仕事 ($U_{rest.}$) は、次式によって表される。

$$U_{rest.} = \int_0^{x_{max}} k_2 x^p dx$$

$$U_{rest.} = k_2 \frac{x_{max}^{p+1}}{p+1} \quad (12)$$

両者のした仕事の差の割合を算出することによって、損失したエネルギーの割合 ($E_{f/loss}$) が算出される。

$$E_{f/loss} = \left(k_1 \frac{x_{max}^{n+1}}{n+1} - k_2 \frac{x_{max}^{p+1}}{p+1} \right) / k_1 \frac{x_{max}^{n+1}}{n+1}$$

$$E_{f/loss} = 1 - \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{n+1}{p+1} \cdot \frac{x_{max}^{p+1}}{x_{max}^{n+1}}$$

$$E_{f/loss} = 1 - \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{n+1}{p+1} \cdot x_{max}^{p-n}$$

式 (10) の右辺を x_{max} に代入する。

$$E_{f/loss} = 1 - \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{n+1}{p+1} \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} \frac{1}{x_{max}^{n-p}} \right)^{p-n}$$

$$E_{f/loss} = 1 - \frac{n+1}{p+1} \quad (13)$$

エネルギーロスは、高さ h_1 からボールを落下させたときの跳ね返る高さ h_2 を測定することで、位置エネルギーの観点からも導出できる。

$$E_{f/loss} = \frac{mgh_1 - mgh_2}{mgh_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1} = 1 - e^2 \quad (14)$$

ここで、 e は反発係数を指すが、詳細については後述することとする。式 (13)(14) より、

$$e^2 = \frac{n+1}{p+1} \quad (15)$$

つまり、圧縮 - 復元過程で得られた個々の指数関数は、反発特性について記述するだけで

なく、両者がボール速度に依存しない説明を可能にすることを示すものでもある (Cross 1999a). 確かに、圧縮局面においては、 $n = 1$ の直線近似よりも $n > 1.2$ の曲線近似の方がよくフィットしていた (図 1-4). この場合、 $n = 1$ は線形バネとして捉えられるが、通常为非線形バネは、 $n > 1$ となる. さらに、復元過程の指数 p は次式によって与えられる (Nathan 2000).

$$p = \frac{1+n}{e^2} - 1 \quad (16)$$

また、図 1-3,4 で示されるように、復元過程においてボールに作用する力は、圧縮されたボールが完全に元の形状に戻る前に 0 となる. 従って、Nathan (2000) は、ボールが接触する時間 (contact time) と力が作用する時間 (collision time) を別物として扱い、例えば衝突速度が 67m/s の場合、接触時間が 1.1ms であるのに対し、衝突時間が 0.6ms であることを指摘している.

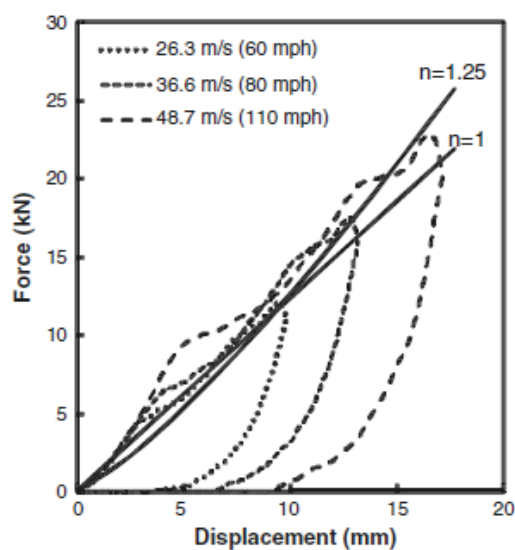


図 1-4 3 種類の投射速度 (高速) で固定されたシリンダー-ソフトボールを投射させた際の力 - 変位曲線. $n=1$ の直線と $n=1.25$ の曲線は、それぞれ圧縮局面における変位に対する応力を近似するための指数を指す. Smith et al. (2010) より引用.

ボール・バットの正面衝突

1600年代の終わりに、ニュートンやその時代の研究者は2つの物体間における正面衝突に対して、2つのシンプルな規則を発見した。この規則は現在でも有効であり、次の単純化された用語により記述される。1つ目は、衝突前の運動量の合計が衝突後の運動量の合計と等しいことである。そして2つ目は、2物体のうちの1つが最初に静止状態にあるか、または別の物体が最初に静止状態にあるか、あるいは両者が互いに接近しているかどうかにかかわらず、衝突後の2つの物体間の相対速度は衝突前の相対速度に対して一定の割合となる。一方で、この規則はある条件下でのみ適用される。ボールとバットに作用する力が衝突による相互の力のみの場合、1つ目の規則は2つのいかなる物体間の衝突でも適用されるが、実際には打者が打撃時にバットを保持している。スイング中における水平面上のバットの運動のみに着目した研究 (Cross 2009) によると、スイング中にバットに作用した力を打者がバットに作用した力として捉えた場合、インパクト直前のバットには、概ねバットの長軸に沿った方向へ300Nをわずかに上回る程度の力が作用していたとされる。一方で、ボール・バット間の衝撃力は、衝突の間に変化するものの、最大で20~40kNに達する (Nathan 2000, Nicholls et al. 2005a, Nicholls et al. 2005b, Nicholls et al. 2006)。従って、ボール・バット間で作用した力が、選手がバットに作用した力よりもはるかに大きいため、打者がインパクトの間に作用させる付加的な力は、ボール・インパクトを扱う研究においては通常無視される (Cross 1998a)。2つ目の原則である「一定の割合」は、衝突後の相対速度が、衝突が観察される座標系に関係なく、一定であることを示す。しかしながら、実際には衝突前の相対速度が増加するとともに、その割合はわずかに減少する (Briggs 1945, Cross 1999a, Guban 2000, Cross 2000, Smith 2001, Hubbard and Stronge 2001, Adair 2002, Smith and Duris 2009)。例えば、野球ボールやソフトボールの相対速度を2倍にすることで、反発係数が10%程度減少することが報告されている

(Smith et al. 2010, Handee et al. 1998). また, Sawicki et al. (2003) は Handee et al. (1998) の測定データを元に, 速度依存の反発係数を次式によって定量化している.

$$e = 0.540 - \left(\frac{v_{rel} - 26.8}{400} \right)$$

ここで, v_{rel} は衝突直前のボールとバットの相対速度 (m/s) を示す. そして, この現象はボールを図 1-5 のようにダンパー (エネルギー減衰器) とバネを備えた粘弾性体としてモデル化することで説明される (Stronge 2000, Goldsmith 2001, Carre 2004, Sutton and Sherwood 2010, Cross 2011).

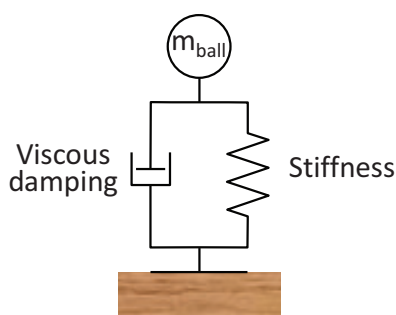


図 1-5 質量 m のボールにバネとダッシュポットを並列に並べたモデル.

2 つ目の規則で言及した「一定の割合」は, 反発係数 (あるいは COR) として知られており, 弾性 (*elasticity*) を示す指標であることから記号 e によって表される. Tait and Steel (1865) によって, 初めて用語「*coefficient of restitution* : 反発係数」が導入され, Briggs (1945) はボールの反発係数の決定因子が何であるのかを変形量や衝突速度, 温度などの観点から調査し, Barnes (1958a, 1958b) は球体同士の反発特性を調査した. Briggs が行った研究以外にも, ボールの温度や湿度といった環境的要因と反発係数との間の関係はこれまでに調査されてきており, ボール温度の上昇に伴って反発係数が増加することや (Adair 2002, Drane and Sherwood 2004, Simth and Faber 2011), ボールの相対湿度が上

昇することで反発係数が減少することが報告されている (Kagan 1990, Kagan and Atkinson 2004, Bahill and Baldwin 2008, Smith 2013).

反発係数は0~1の間にあり, $e = 1$ の場合は完全弾性衝突 (elastic impact) と表現され, それ以外の $e < 1$ の場合は非弾性衝突 (inelastic impact) と表現される. また, 全く弾まない $e = 0$ の場合は, 完全非弾性衝突 (plastic impact) と表される. インパクト表面が変形していなければ, エネルギーロスは主としてボール中の内部摩擦に帰することができる (Cross 1999b). インパクトによって失われるボールの運動エネルギーの割合 ($E_{f/loss}$) は, 接触面が静止状態かつ接触面からエネルギーが失われなければ, 式 (14) で示したように, $E_{f/loss} = 1 - e^2$ によって規定される. つまり, 反発係数が 0.5 のボールは, 衝突によってエネルギーの 75%が損失することになる (Nathan 2003). ボールが静止状態の表面から弾んだ場合, e は投射の速度と跳ね返り速度の比から与えられるため, ボールのみ反発係数, あるいはボール・壁反発係数と表現され, 「記号: e_0 や e_b 」が用いられる (Nathan 2000, Smith 2001, Nathan 2003, Nathan 2004). そして, ボール反発係数に対するボール・バットの反発係数の割合は, バットの反発特性を表す指標という意味合いで **Bat Performance Factor (BPF)** と呼ばれる (Smith 2001, Nathan 2003).

$$\text{BPF} \equiv \frac{e}{e_0} \quad (17)$$

BPF = 1 の場合, バットへの衝突であっても反発特性が壁と等しく, エネルギーロスの全てがボールに起因することを示す. また, BPF > 1 であった場合には, バットの反発特性が壁よりも優れていることを示す.

バットとボールの衝突は, 実際には両者の並進・回転運動および振動の伴う複雑な現象である. しかしながら, バットの質量が「有効な」質量と取り替えられるならば, ボール・バットのインパクトは両者の接触点からなる 2 点間の衝突として扱うことができ, 比較的

単純な問題として捉えられる。そこで、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を仮定する (図 1-6)。ここで、ボールの質量と速度を m と v によって表し、バットの質量と速度を M と V によって表すこととする。また、下付き文字 1 と 2 は衝突前・後を指す。なお、以下に示す式において、ボールとバットは右側への運動を正とする。

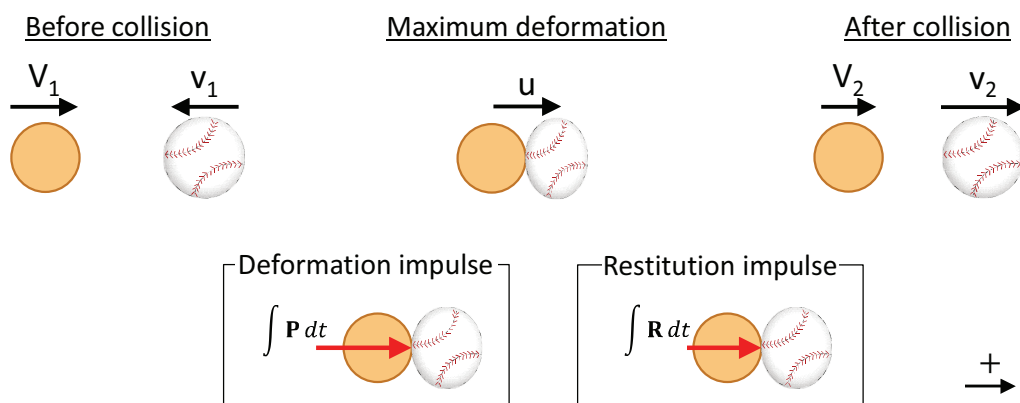


図 1-6 ボール・バット間の正面衝突によるインパクトモデル

衝突前後のボールとバットの運動は、運動量保存の法則を用いて次式によって表される。

$$MV_1 - mv_1 = MV_2 + mv_2 \quad (18)$$

ボールとバットが接触する期間を、最もボールが変形した瞬間を基準としてボールの圧縮期間と復元 (回復) 期間の 2 つに分類する。運動量と力積の原理を適用することによって、変形の期間にボールへ作用した力 (P) は次式によって算出される。

$$-mv_1 + \int P dt = mu \quad (19)$$

ここで速度 (u) は、ボールが最も変形した時のボールとバットの共通の速度である。変形期間と同様に、復元の期間にボールへ作用した力 (R) は、次式によって算出される。

$$mu + \int \mathbf{R} dt = mv_2 \quad (20)$$

反発係数 (e) は、復元期間に作用した力積と圧縮期間に作用した力積の比として定義されている。

$$e = \frac{\int \mathbf{R} dt}{\int \mathbf{P} dt} \quad (21)$$

式 (19)(20) を式 (21) に代入すると、反発係数は復元期間と圧縮期間の相対速度の比として表される。

$$e = \frac{mv_2 - mu}{mu + mv_1} = \frac{v_2 - u}{u + v_1} \quad (22)$$

ここまでボールを主体として考えてきたが、バットに作用する力を考えると反作用力が与えられるため、反発係数は次のように表される。

$$e = \frac{-\int \mathbf{R} dt}{-\int \mathbf{P} dt} = \frac{Mu - MV_2}{MV_1 - Mu} = \frac{u - V_2}{V_1 - u} \quad (23)$$

反発係数はボールとバットの共同特性となるため、両者の値は等しく、一般的に用いられているような、衝突前後の相対速度の比として、次のように書き換えられる。

$$e = \frac{(v_2 - u) + (u - V_2)}{(u + v_1) + (V_1 - u)} = \frac{v_2 - V_2}{v_1 + V_1} \quad (24)$$

従って、打球速度 (v_2) は、式 (18)(24) を用いることで以下のように表される。

$$v_2 = \left(\frac{eM + M}{M + m}\right)V_1 + \left(\frac{eM - m}{M + m}\right)v_1 = \left(\frac{1 + e}{1 + \frac{m}{M}}\right)V_1 + \left(\frac{e - \frac{m}{M}}{1 + \frac{m}{M}}\right)v_1 \quad (25)$$

ここで着目すべき点は、ボール・バット間の反発係数がわかっているならば、衝突後のバット速度を測定する必要がないことにある。この式を参照すると、打球速度を高めるには、ボールに対して相対的に質量の大きなバットを用いることが有効となる。式 (25) における投球速度 (v_1) の係数に相当する 2 番目の括弧内の式は、bounce factor (記号: q, Cross 2011) や ACOR (Apparent COR : 見掛けの反発係数, Cross 1999a), e_A (collision

efficiency : 衝突効率, Nathan 2003) と表現されている.

$$\frac{e - \frac{m}{M}}{1 + \frac{m}{M}} = q = ACOR = e_A \quad (26)$$

本研究では q あるいは e_A を使用することとし, 式 (25) におけるバット速度 (V_1) の係数に相当する 1 番目の括弧内の式は, 次式によって表される.

$$\frac{1 + e}{1 + \frac{m}{M}} = 1 + q \quad (27)$$

m は M よりも小さいため, q は常に e より小さい. また, 式 (26)(27) を式 (25) へ代入すると, 打球速度を求める式は次のように簡略化される.

$$v_2 = (1 + q)V_1 + qv_1 \quad (28)$$

そして, 式 (28) を変形することで, q は次式のように衝突直前のバット座標系に対する, 衝突前後のボールとバットの相対速度として表される (Nathan 2003).

$$q = \frac{v_2 - V_1}{v_1 + V_1} \quad (29)$$

なお, 衝突前のバットが静止状態を仮定した場合には, q は投球速度 (v_1) と打球速度 (v_2) の比から算出される.

$$q = \frac{v_2}{v_1} \quad (30)$$

Hester and Koenig (1993) は, Bounce factor や Collision efficiency という用語自体を用いてはいなかったが, 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. 式 (28) は, q の値を用いることで打球速度が評価されることを示すものの, ここには 2 つの複雑化させる要素が存在する. 1 つは q と V_1 の両者がともに, インパクトポイントに応じて変化することにある. インパクト直前におけるバットの運動は, 主としてグリップ付近を中心とした回転運動となる (Crisco et al. 2002, Greenwald et al. 2001) ため, ヘッド側でのインパクトほど, 衝突位置のバット速度は大きくなる. しか

し、相反するようにバットヘッド付近でのインパクトの場合、重心から離れることや反発係数が減少することで q の値が小さくなる。そして、2つ目の要因は、重いバットよりも軽いバットの方が大きな速度でスイングできるものの、これも相反するように軽いバットほど q が相対的に小さくなるという点にある。これら要因が打球速度に与える相互作用については、後述することとする。

ボール・バット間の衝突に伴うエネルギーロスを算出するために、図 1-6 の衝突モデルを衝突前のボールとバットの運動量の合計が 0 となるように座標系を変更する (Cross 2000)。ボールとバットの運動量の合計は衝突前後で等しいため、衝突後の運動量の合計も 0 となる。これが仮定されると、正面衝突によるインパクトモデルは、図 1-7 のように修正され、 $MV_3 - mv_3 = 0$ になると同時に、 $MV_4 - mv_4 = 0$ となる。衝突前後のボールとバットの速度が異なるものの、これは単に座標系が異なるだけで、反発係数やエネルギーロスといった本質的な部分は同じである。そして、図 1-6 との混同を避けるため下付き文字 3 と 4 を使用する。

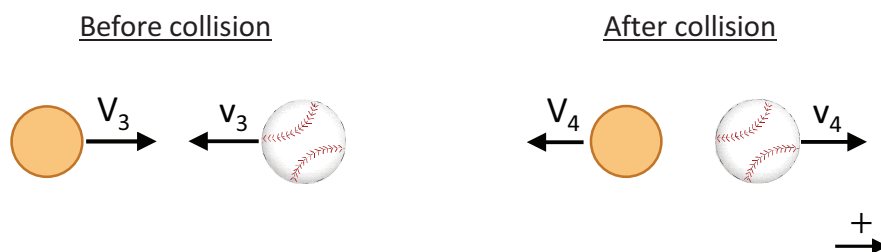


図 1-7 衝突前のボールとバットの運動量が等しくなるように座標系を変換させた場合の、ボール・バット間の正面衝突によるインパクト。右向きの運動を正とする。

この衝突に対して、反発係数は次式のように表される。

$$e = \frac{v_4 + V_4}{v_3 + V_3} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3} \quad (31)$$

そして、

$$V_4 = V_3 e \quad (32)$$

また、衝突前のボールとバットの運動エネルギー (E_{pre}) は、次式によって表される。

$$E_{pre} = \frac{1}{2} M V_3^2 + \frac{1}{2} m v_3^2 \quad (33)$$

$v_3 = M V_3 / m$ であることから、これを式 (33) に代入すると次のように表される。

$$\begin{aligned} E_{pre} &= \frac{1}{2} M V_3^2 + \frac{1}{2} m \left(\frac{M V_3}{m} \right)^2 \\ E_{pre} &= \frac{1}{2} M V_3^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

衝突後の運動エネルギー (E_{post}) も同様に、次式によって表される。

$$\begin{aligned} E_{post} &= \frac{1}{2} M V_4^2 + \frac{1}{2} m v_4^2 \\ E_{post} &= \frac{1}{2} M V_4^2 + \frac{1}{2} m \left(\frac{M V_4}{m} \right)^2 \\ E_{post} &= \frac{1}{2} M V_4^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

式 (32) を式 (35) へ代入すると、次のように書き換えられる。

$$E_{post} = \frac{1}{2} M V_3^2 e^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right) \quad (36)$$

従って、衝突によって失われる運動エネルギーの割合 ($E_{f/loss}$) は、次のように表される。

$$\begin{aligned} E_{f/loss} &= \frac{E_{pre} - E_{post}}{E_{pre}} \\ E_{f/loss} &= \frac{\frac{1}{2} M V_3^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right) - \frac{1}{2} M V_3^2 e^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right)}{\frac{1}{2} M V_3^2 \left(1 + \frac{M}{m} \right)} \\ E_{f/loss} &= 1 - e^2 \end{aligned} \quad (37)$$

これは、式 (14) で示したボールのみが衝突によって失われるエネルギーの割合と等しい。

完全弾性衝突 $e = 1$ の場合、失われるエネルギーは 0 となる。また、完全非弾性衝突 $e = 0$ の

場合、衝突前のエネルギーは全て失われることになる。

斜め衝突を伴わない2次元平面上のバットとボールの衝突

ボールとバットの衝突を図1-8のように示す。ボールはバットの長軸に沿ったいかなる場所にもインパクトさせられるため、重心を外したインパクトは全て偏心衝突 (eccentric impact) となる。従って、このようなインパクトは厳密には直衝撃 (direct central impact) とは定義されない。このケースではバットが衝突前に回転しており、その回転速度が衝突によって変化することに複雑化させる要因がある。しかしながら、この衝突も図1-6に示すインパクトと本質的に同じであり、2点間の衝突として記述することができる。なお、ボールとバットの衝突は、ボールとインパクトポイントにおけるバットの速度ベクトルが一直線上になるようなインパクトを仮定し、これらの速度ベクトルとバットの長軸が直交する位置でインパクトするものとする。そして、右向きへの運動と時計回りの回転運動を正とする。

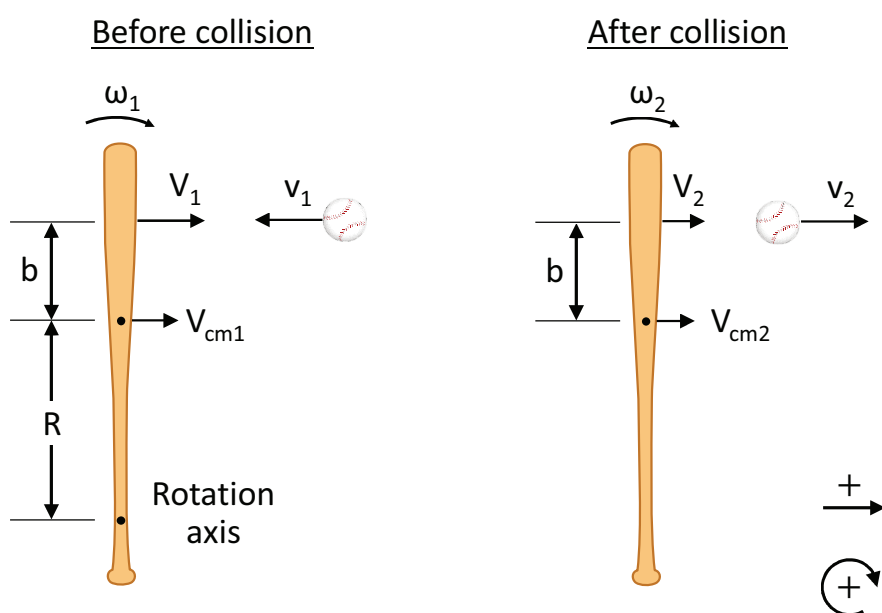


図 1-8 バットのインパクト位置と並進・回転運動を考慮に入れた衝突モデル。右向きの運動と、時計回りの回転を正とする。

図 1-8 では、バットはグリップ付近の任意の軸を中心として角速度 ω_1 で回転する。バットのインパクトポイントは速度 V_1 でスイングされ、バットの質量中心 (cm) は速度 V_{cm1} でボールに接近する。回転中心から質量中心までの距離を R とし、質量中心速度は $V_{cm1} = R\omega_1$ で表される。また、回転中心からインパクトポイントまでの距離を $R + b$ と置くと、衝突前後のインパクト位置におけるバット速度は次のように表される。

$$V_1 = (R + b)\omega_1 = V_{cm1} + b\omega_1 \quad (38)$$

$$V_2 = V_{cm2} + b\omega_2 \quad (39)$$

また、運動量と力積の原理より、バットの重心運動は次式によって与えられる。

$$-\int Fdt = M(V_{cm2} - V_{cm1})$$

$$V_{cm2} - V_{cm1} = -\frac{\int Fdt}{M} \quad (40)$$

衝突によってバットに作用する力は、重心まわりにモーメントを作用させる。

$$-Fb = I_{cm} d\omega/dt \quad (41)$$

式 (41) を時間に関して積分する。

$$-b \int Fdt = I_{cm}(\omega_2 - \omega_1)$$

$$(\omega_2 - \omega_1) = -\frac{b \int Fdt}{I_{cm}} \quad (42)$$

運動量と力積の原理より、インパクトポイントの並進運動は次式によって与えられる。

$$-\int Fdt = M_e(V_2 - V_1) \quad (43)$$

ここで、 M_e はインパクトポイントにおけるバットの有効質量を示す。式 (43) に式 (38)(39) を代入する。

$$-\int Fdt = M_e(V_{cm2} + b\omega_2 - V_{cm1} + b\omega_1)$$

$$-\int Fdt = M_e\{(V_{cm2} - V_{cm1}) + b(\omega_2 - \omega_1)\} \quad (44)$$

式 (40)(42) を代入する.

$$-\int Fdt = M_e \left\{ -\frac{\int Fdt}{M} + b \left(-\frac{b \int Fdt}{I_{cm}} \right) \right\} \quad (45)$$

従って, 式 (45) からバットの有効質量は次のように算出される (Cross 2000, Nathan 2003, Cross 2004, Cross 2005a).

$$M_e = \frac{M}{1 + \frac{Mb^2}{I_{cm}}}, \text{ あるいは } \frac{1}{M_e} = \frac{1}{M} + \frac{b^2}{I_{cm}} \quad (46)$$

つまり, 運動量保存の法則を示す式 (18) の M を M_e と取り替えることによって, バットとボールの間の衝突は, 質量 M_e のバットと質量 m のボールの間の質点同士の衝突として単純化される. そこで, バットの有効質量がインパクト位置によってどのように変化していくのかを次に示す.

Cross (2011) は式 (46) を利用して, 31oz (879g) の木製バットと 30oz (850g) の金属バットに対する, 質量中心からインパクト位置までの距離と有効質量 (M_e) の関係を調査した (図 1-9). バットの長さは両者ともに 33in. (84cm) であり, 木製バットの質量中心はバットヘッドから 10.9in. (27.7cm) に位置し, 金属バットの質量中心はバットヘッドから 12.3in. (31.2cm, 木製バットよりも 3.55cm グリップ側) に位置したものを使用した. 木製バットの質量中心まわりの慣性モーメントは 2460 oz in.² (0.045kgm²) であり, 金属バットの質量中心まわりの慣性モーメントは 3060 oz in.² (0.056kgm²) である. 質量中心付近のインパクトでは, 質量の大きな木製バットの方が有効質量も大きくなったものの, 木製よりもわずかに軽量の金属バットの有効質量は, 先端側でのインパクトで大きくなっていった (図 1-9 (a)). 一方で, バット間で質量中心の位置に差があるため, バットヘッドからの距離に換算すると, ヘッド側の有効質量は木製バットと金属バットでほぼ等しかったも

の、それ以外のインパクトでは、全て木製バットが金属バットを上回っていた(図 1-9 (b)).

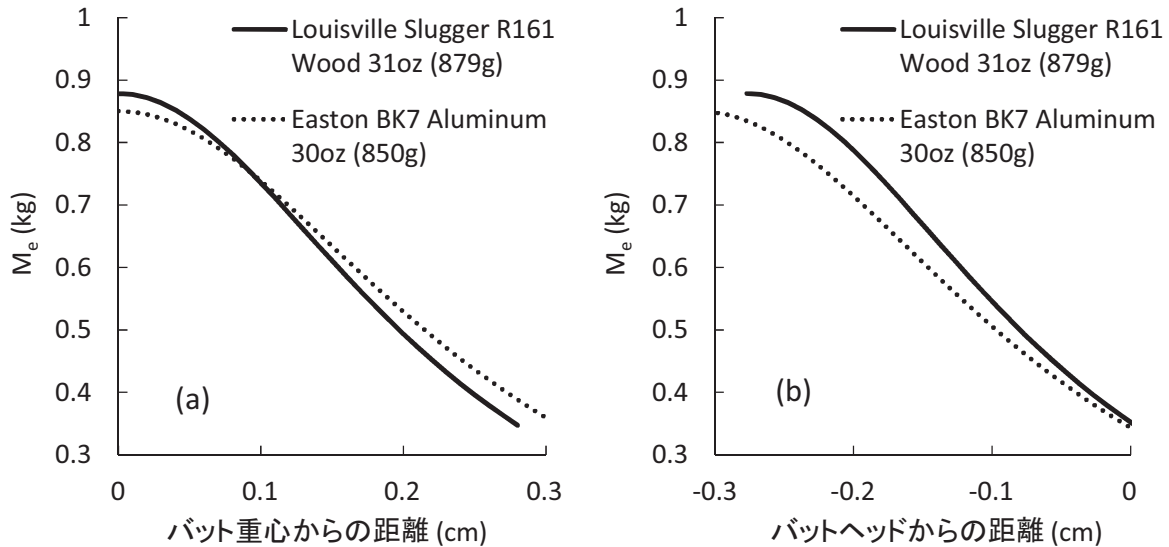


図 1-9 (a): 金属バットと木製バットにおけるバット重心からインパクト位置までの距離と有効質量 (M_e) の関係. 実線が木製バットを示し, 点線が金属バットを示す. Cross (2011) を改編.
(b): 横軸をバットヘッドからインパクト位置までの距離に変更.

有効質量の打球に与える影響を確かめるには、まず反発特性との関連を確認しておく必要がある。反発係数と collision efficiency (e_A) は独立した評価指標ではなく、次式によって関連付けられる。

$$e_A = \frac{e - r}{1 + r} \quad (47)$$

ここで、 r は recoil factor と呼ばれ (Nathan 2003)、ボールとバットの慣性特性にのみ依存する。従って、recoil factor はバットの有効質量に対するボールの質量の比として定義されている。

$$r = \frac{m}{M_e} \quad (48)$$

Nathan (2003) は、前述した理論式から得られる様々な変数の相互作用を調査した。

この研究では、長さ 34in. (84cm)、質量 31oz (879g) の一般的な木製バットを使用し、45rad/s の速度で回転するバットへ向けて、 $e_0 = 0.5$ のボールを 90mph で投射させた条件で数値シミュレーションを行っている。その結果、反発係数はバットヘッドから 14.0cm (4.5in.) の位置で最大となり、この位置から離れたインパクトほど小さかった (図 1-10)。また、反発係数の最大値は概ねボール・壁反発係数 $e_0 = 0.5$ に一致しており、1次と2次の振動曲げモードの節に相当する位置 (1次: 17.3cm, 2次: 13.2cm) の間で記録していた。衝突に伴う相互の力以外の影響を受けない状態を示す「フリー」のバットに対する recoil factor (r) は、バットの質量中心位置で最小化されるため、collision efficiency (e_A) が最大化される位置は、反発係数の最大位置よりも約 1in. (2.5 cm) グリップ側となった。打球速度 (v_f) は、式 (27) から、 e_A と v_{bat} の変動によって決定されるが、回転運動するバットの移動速度がヘッド側ほど大きくなることも考慮する必要がある。すると、インパクト位置と打球速度の関係を示す曲線は、 e_A の曲線よりもヘッド側へシフトしているが、結果的には増減の傾向が反発係数に近似していた。すなわち、反発係数が最大となるインパクト位置は有効質量が小さくなるものの、バット速度が大きくなるために、結果的に打球速度が最大化されるポイントになったといえる。

一方で、バントのようなバット速度が 0 のインパクトの場合、打球速度は $v_f = e_A v_{pitched}$ で表されるため、 e_A が最大化されるポイントで最大となる。バントの場合には、バットを持つ手の位置がスイング時とは異なるために、インパクトポイントに対する反発係数や有効質量の関係が変化する可能性があるものの、理論上はバントとスイングの伴う打撃では、打球速度が最大化されるインパクトポイントが異なるといえる。さらに、バットヘッド付近のインパクトでは e_A がマイナスとなるため、打球が全く弾まない (デッドスポット, Cross 1997, Kotze et al. 2000), あるいは打球が衝突後も投球と同じ方向に速度を持つ可

能性がある．これらに関しては，今後の実測研究が望まれる．

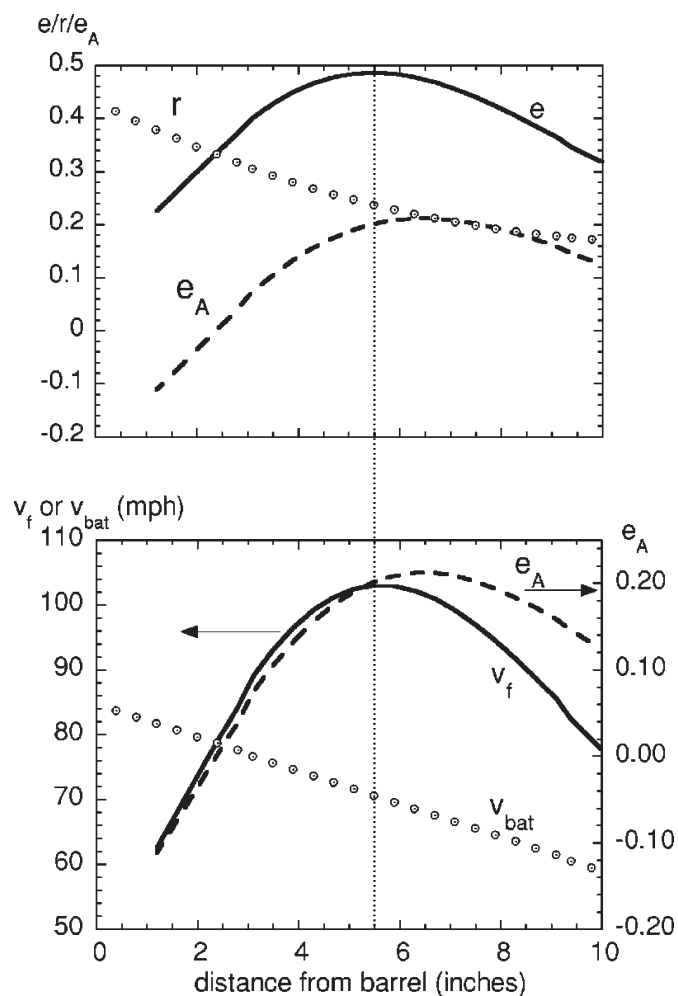


図 1-10 90mph で投射されたボールを一般的な木製バットを用いてグリップエンドからヘッド側へ1インチの位置を中心に45rad/sの角速度でスイングした時の衝突結果. 上段は反発係数(e), recoil factor(r), collision efficiency(e_A)を示しており, 下段は collision efficiency(e_A), バット速度(v_{bat}), 打球速度(v_f)を示す. Nathan (2003)より引用.

典型的なスイートスポットでのボールインパクトを仮定した場合、 $e \approx 0.5$ 、 $r \approx 0.25$ となることから、式 (47) から $e_A \approx 0.2$ が導出され、これを式 (28) へ代入すると、打球速度は次式のように書き換えられる (Nathan 2003).

$$v_2 = 1.2V_1 + 0.2v_1 \quad (49)$$

つまりこの式は、バットの芯でボールを捉えた場合には、打球速度に影響するバット速度 (V_1) と投球速度 (v_1) の割合が、6 : 1であることを示す.

2.3 バットの性能評価

2.3.1 バットの芯について

それでは、これまでに記述してきたバットの「芯」や「スイートスポット」は、どのように定義され、バットのどこに位置するのかについて考えていく。これまでのところ共通した見解は得られておらず、バットの芯に対する正確な性質を物理学の観点から突き止めるのは難しいと指摘されている (Brody 1986, Noble and Walker 1994, Cross 1998a)。バットがボールと衝突するとき、反発係数はバットの質量中心の速度ではなくインパクトポイントの速度に基づいて定義される。また、ボールがフリーで吊るされたバットや手で持ったバットに衝突した時、バットは衝撃によって跳ね返され、ボールによって与えられた並進・回転以外のエネルギーはバットに振動を与える。バットに与えられた並進および回転の運動エネルギーは失われないが、バットの振動エネルギーは消失したエネルギーとみなされるため、このロスによって反発係数は縮小する (Nathan 2000)。すなわち、振動エネルギーによるロスが最小化されるインパクトポイントにおいて反発係数が最大となる (Nathan 2000, Watts and Bahill 2000)。バットに生じる振動は主に 2 種類に分けられており、最も打球に影響するものが振動曲げモードである。これはバット固有のものであるが、実際には組み合わさった複数の振動も、図 1-11 (a) のように分類することができる。そして、各振動モードには、振動を全く生じさせない振幅が 0 となる節 (node) と、振幅が最大化する腹 (anti-node) が存在する。すなわち、振動モードの節となるポイントでインパクトすることによって失われるエネルギーは最小化されるが、ここで重要となるのが振動エネルギーの大きさが各振動モードによって異なること、ならびにそれぞれの振動モードで節の位置が異なることである。そして、エネルギーが最も大きい 1 次 (基本) 振動モードの節の位置を、バットの芯とする研究が多い (Van Zandt 1992, Adair 2001, Adair

2002, Cross 2004). また, 2 次の振動曲げモードのエネルギーも 1 次モードと同程度といった報告もあり (Nathan 2000), 1 次と 2 次の振動モードの節の位置付近を芯とする研究も散見される (Cross 1998a, Cross 2001, Nathan 2000, Cross 2001).

スイートスポットで反発係数を測定する便利な方法は, 完全に固定されたバットに対するボールの入射と反射の速度を測定することである. バットが完全に固定された場合, バット自体は跳ね返らず, 振動もしない. したがって, 反発係数は単に跳ね返り速度と投射速度の比となる. 一般に, 反発係数はボールとインパクト表面間の共同特性であり, ボール自体の反発係数より小さくも大きくもなり得る (式 17 を参照). 柔軟で弾性的な表面にボールを衝突させた場合, ボールの圧縮に伴うエネルギーロスが縮小され, 反発係数は増加する (Naruo and Sato 1998). この場合, 式 (17) で示した BPF は 1 を上回ることになる. この現象はトランポリン効果と呼ばれ, 中空の金属バットにおいてフープモードの腹の位置で観察される (図 1-11(b), Handee et al. 1998 Nathan et al. 2004, Russell 2004, Smith et al. 2010, Sutton and Sherwood 2010). ボールの衝突時間と振動の 1 周期が概ね等しくなる 1250Hz が最適周波数とされるが (Sutton and Sherwood 2010), ボールがバットに対して相対的に柔軟な場合にはエネルギーはバットに蓄積されないため (Cross 2011), トランポリン効果を活かすにはボールとバットの堅さ (stiffness) が重要となる.

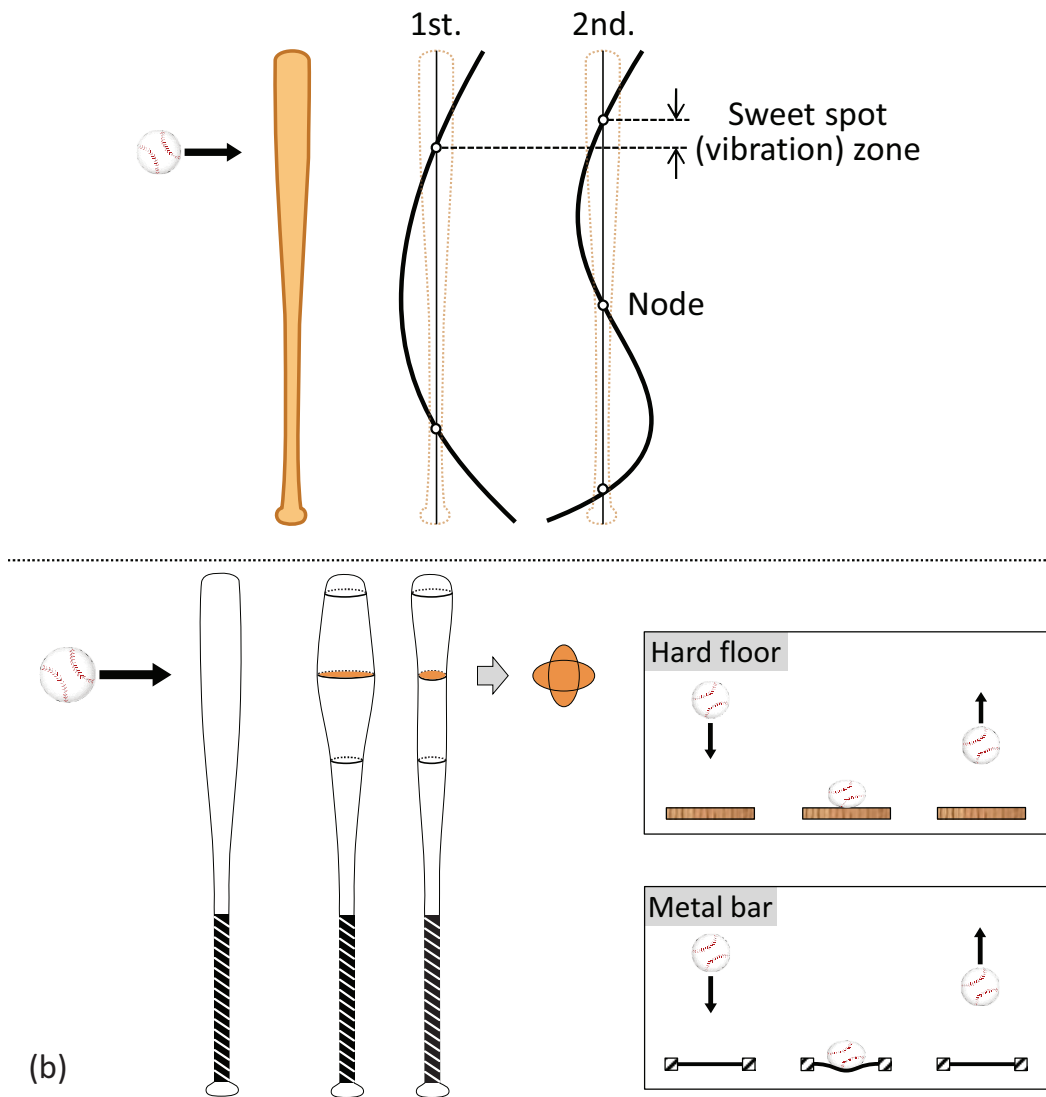


図 1-11 バットの衝突に伴う 2 つの振動. 上段(a) : 振動曲げモード. 1 次モードは振動の腹が 1 つの場合であり, 2 次モードは振動の腹が 2 つの場合である. 下段(b) : フープモード. 金属バットのような中空のバットで生じやすく, バットの断面が衝突によって楕円になる. 右側の図はバットがトランポリンのように変形することを模式的に描いたものである. Cross (2011) より引用.

バットの芯を定義する上での、振動モードに次いで重要なものとして挙げられる要素が、バットの打撃中心 (center of percussion), あるいは撃心である。ボールがバットの質量中心に衝突した場合、衝突後のバットの運動は並進運動のみとなる (図 1-12 (a)). これに対し、質量中心を外した衝突の場合、衝突後のバット重心は、並進と回転が合わさった運動を呈する。一方で、衝突後のバットの運動を重心でなく任意の点を基準とすると、バットはある軸回りの回転のみの運動として捉えられる。そして、バットの打撃中心でインパクトした場合には、バットはグリップ付近を中心とした回転運動のみを呈する (図 1-12 (b)). つまり、打撃中心でのインパクトは、バットのグリップ部に反動となる衝撃を与えないのである。なお、バットの打撃中心は、次のような手順で算出することができる。バットに撃力が作用する時間は非常に短く、作用線の方向が変化しないと仮定すると、撃力によってバットの重心は、並進と回転による運動を行う (Cross 2011).

$$F = M \frac{dV_{cm}}{dt} \quad (49)$$

$$Fb = I_{cm} \frac{d\omega}{dt} \quad (50)$$

式 (50) を式(49) に代入する.

$$M \frac{dV_{cm}}{dt} = \frac{I_{cm}}{b} \frac{d\omega}{dt} \quad (51)$$

バットが角速度 ω で回転している場合、重心速度は $V_{cm} = R\omega$ によって与えられる。従って、

$$\frac{dV_{cm}}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} \quad (52)$$

式 (52) を式 (51) に代入する.

$$b = \frac{I_{cm}}{RM} \quad (53)$$

つまり、バットの打撃中心は、バットの質量中心まわりの慣性モーメントと、バットの重心位置から回転中心までの距離、バットの質量から算出される。

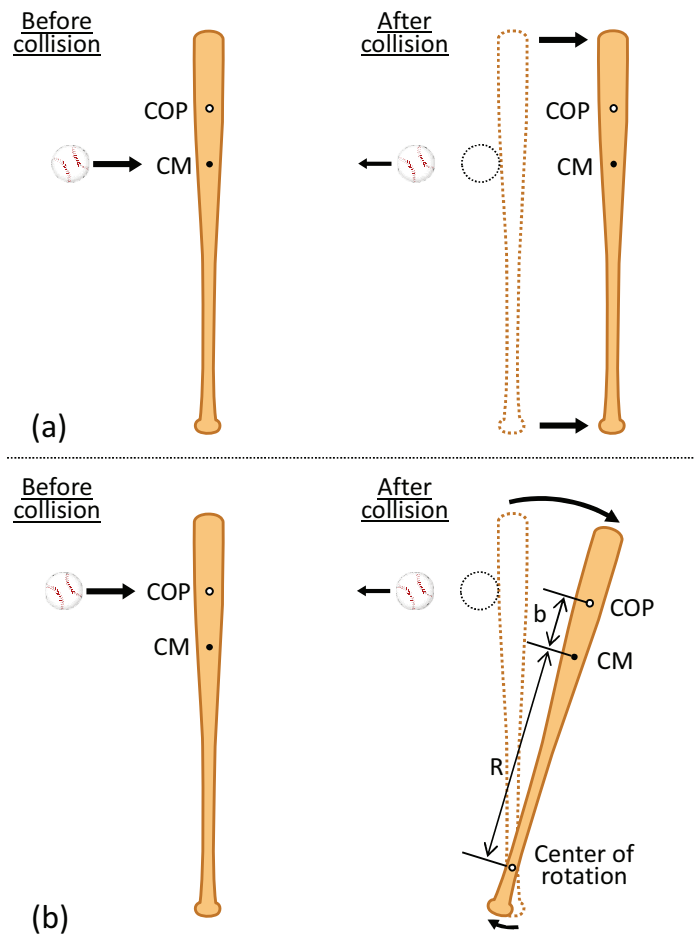


図 1-12 バットにボールが衝突した際のバットの挙動. 上段(a) : バットの重心(CM)にボールが衝突した場合, バットは右側へ並進運動する. 下段(b) : バットの打撃中心(COP)にボールが衝突した場合, バットはグリップ部を中心とした回転運動をする.

実際, バットの振動モードの節の位置と打撃中心の位置は隣接しており, Brody (1986) や Noble (1994) はバットの芯を振動モードの節と撃心の位置を包含する領域とすることを提案した. また, 具体的な位置を報告した研究によると, グリップエンドからヘッド側へ約 80~85%の位置 (Bahill 2004) や, バットヘッドから 15cm の位置 (Noble and Eck 1986, Brody 1986, Noble and Walker 1994, Cross 1998a) などが挙げられている. この他, 打

者自身が最も満足のいったインパクト位置を Joy spot と呼び (Williams and Underwood 1986), この位置をバットの芯とすることや, 打球速度が最大化されるエリア (Nathan 2000, Shenoy et al. 2001, Crisco et al. 2002, Nathan 2003) など, さまざまである.

2.3.2 バットの慣性モーメントとパフォーマンスとの関連

バットの物理的特性が, スポーツパフォーマンスにどのように影響するのか. この疑問に対する共通見解は, 重いバットが軽いバットより強力であること. そして重いバットが軽いバットよりも速くスイングできないことである (Cross and Nathan 2009). これらの相互作用を Bahill and Karnavas (1989) は初めて調査し, Bahill and Freitas (1995) は打球速度が最大化される各個人の理想的なバットの重量を算出した. その後, スイングスピードに関連する物理的特性として, Fleisig et al. (2002) はバットの慣性モーメントに着目し, グリップエンドまわりの慣性モーメントが大きくなるにつれ, スイング速度が直線的に小さくなることを指摘した. その後, Smith et al. (2003) は, バットの慣性モーメントが 1.6 倍に増加した場合に, スイングスピードが 10%減少することを指摘した他, 慣性モーメントとスイングスピードの関係は数多く検討されてきている (Nicholls et al. 2003, Koenig et al. 2004, Cross and Bower 2006, Cross and Nathan 2009, Nathan et al. 2011). グリップ付近を通る軸まわりの慣性モーメントは, 『swing weight』と呼ばれ, この変数は競技レベルの高い打者においても, 打者のスイングし得る最大速度に近似することが特徴である. Cross and Nathan (2009) は, Greenwald et al. (2001) が測定した野球選手の打撃データを元に, バットの角速度 (ω) がグリップエンドまわりの慣性モーメント (I_0) を用いて, 次式により近似されることを示した.

$$\omega = \frac{31.1 \text{ rad/s}}{I_0^{0.28}} \quad (54)$$

この結果は, Fleisig et al. (2002) の測定データとも類似していた. バットの swing weight は, 慣例的にグリップエンドから 6 インチ (15.24cm) の位置を軸とした慣性モーメントとして測定される (Smith 2008). ゆえに, 重心まわりの慣性モーメント (I_{cm}) は, 平行軸の定理 ($I_{cm} = I_A + Md^2$) を用いて計算される. I_A がグリップのどの点まわりの swing weight であっても, R をその軸からインパクト位置までの距離とした場合には, インパクトポイントにおけるバットの有効質量は, 次式によって近似される (Cross 2011, Cross and Nathan 2009).

$$M_e = \frac{I_A}{R^2} \quad (55)$$

Collision efficiency (e_A) は, 実際の質量に対しては関連が小さいものの, swing weight に対しては強く関連する (図 1-13). 一般に, ボールは軽いバットより重いバットによるインパクトの方がよく弾むが, 反発特性に関しては質量分布に依存するため, 必ずしもそうではない. グリップ付近が軽くヘッド側が相対的に重い, いわゆるトップバランスと呼ばれるバットは一般的なバットよりもよく弾む. q (bounce factor) は, バットの『本質的なパワー: "intrinsic or inbuilt power"』と表現されるように (Cross and Nathan 2009, Cross 2011), swing weight の大きなバットほど, 大きなパワーを有していることになる. 一方, swing weight の大きなバットは, 慣性モーメントによる影響から swing weight の小さなバットと同じ速度でスイングできない (式 54 参照). しかしながら, swing weight が増加するとともに, 打球速度もわずかに増加することが報告されている (Cross 2011, Smith and Kensrud 2013, Cross and Bower 2006). 速度の異なる投球に対する swing weight と打球速度の関係を図 1-14 に示す. 実線は長さ 83.8cm のバットであり, 点線は長さ 86.4cm のバットである. 投球速度が大きくなるほど打球速度が増加し, 打球速度の最大値は速度の大きな投球ほど Swing weight も大きくなっていった. すなわちこの結果は,

速度の小さな投球に対しては、慣性モーメントの小さなバットを用いることは有効であるが、投球速度が大きくなるにつれて慣性モーメントの大きなバットを用いることが有効であることを示すものである。しかし、一般的にコーチは、打球速度が最大化されるバットの質量よりも 2~3%軽いバットを使用することでバットコントロールを向上させるよう打者に求めるとされる (Watts and Bahill 2000)。

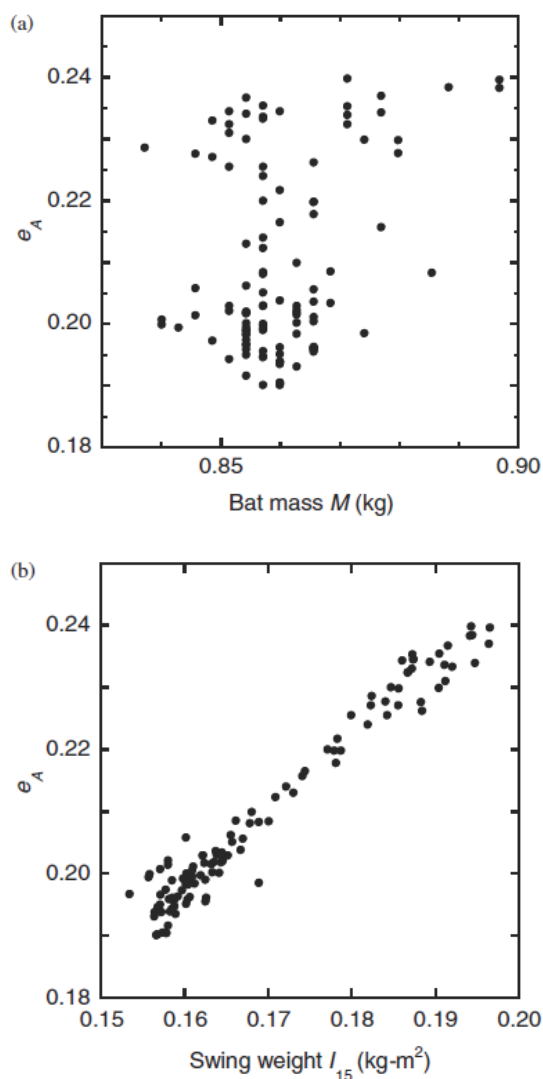


図 1-13 (a) バットの質量と Bounce factor (e_A または q) の関係と, (b) Swing weight と Bounce factor (e_A または q) の関係. Cross and Nathan (2009) より引用.

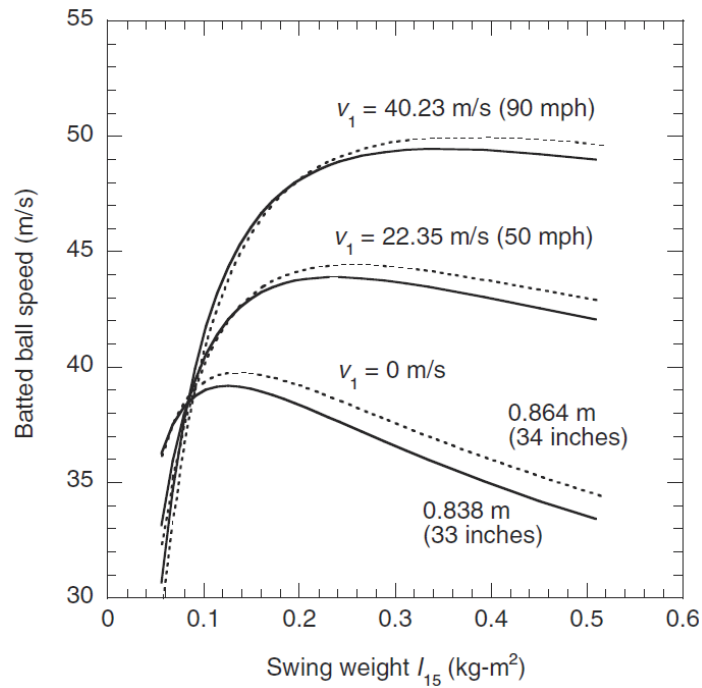


図 1-14 速度の異なる投球に対する Swing weight と打球速度の関係. 実線は長さ 83.6cm のバットであり, 点線は長さ 86.4cm のバットである. Cross and Nathan (2009) より引用.

2.3.3 バットの規制について

中空の野球バットやソフトボールバットは, 1970 年代中頃に導入された. 元々は, 木製バットによる打撃では, 芯を外した際にバットを折ってしまうリスクが高く, アマチュア選手にとっては経済的な影響が大きいため, 折れ難いバットという目的で金属バットが導入された. 金属バットの導入による主な問題は, 安全性, ゲームの伝統, およびオフenseとディフェンスの間のバランスである. Bryant et al.は, 1977 年に金属バットを用いた際の打球速度が, 木製バットよりも 1.8 m/s 大きく, 金属バットの方が速度の面で性能が優れていると指摘した. しかしながら, この研究が行われて以降, 金属バットのデザインや性能が劇的に改善され, Greenwald et al. (2001) は従来の木製バットとのギャップ

が広がっていることを指摘している。ボールの質量やバネ定数といった物理的特性を計測する背景には、打球が野手（特に投手）へ衝突した際に、傷害にどの程度結び付くのかといった安全性への注意が含まれている（Janda et al. 1992, Viano et al. 1993, Fleisig et al. 2002, Nicholls et al. 2004）。さらに、Crisco et al. (1997) や Handee et al. (1998) は、傷害の程度が、ボールの質量やバネ定数だけでなく、粘弾性の影響も受けることを報告している。Nicholls et al. (2005a) は、投手が打球を回避するには少なくとも 0.4 秒必要であると指摘したが、Greenwald et al. (2001) や Mcdowell and Ciocco (2006) によると、金属バットを用いた場合には打球がインパクトから 0.4 秒で投手まで到達するという。ソフトボール用の合成バットを用いた打撃では、12%以上の試技が推奨された安全限度の速度を超過していたとされる（Mcdowell 2004）。これらを踏まえ、全米体育協会（NCAA）は、反発係数がバットの長軸上のどのインパクト位置でも 0.50 を超えてはならないという規則を 2011 年に発表した。日本においても、バットの反発に関する規制は行われており、プロ野球では反発を高めるために用いられていた圧縮バットが 1981 年のシーズンから禁止されている。社会人野球ではそれまで使用していた金属バットを、2005 年シーズンより全ての大会で木製バットを使用するよう義務付けた。高校野球においても、2001 年から 900g 以下のバットを禁止している。

2003 年、メジャーリーグにおいてシカゴ・カブスに所属するサミー・ソーサがコルク入りのバットを使用していることが、折れたバットから発覚した。このバットは、ヘッドの部分から円柱状に穴を空け、くり抜いた部分にコルクを挿入しており、バットに使用される木材よりもコルクの方が軽いため、スイング速度を増大させる効果を狙ったものである。Nathan et al. (2011b) は、コルク入りのバットを用いることで大きな打球速度が獲得できるのかどうかを検証した。所定の軸まわりにのみ自由に回転できるようピボット固定

されたバットにボールを衝突させる実験を行った結果、反発係数には差がみられなかったものの、**Bounce factor** についてはコルクバットの方が小さかったことを報告している。また、慣性モーメントを利用したバット速度の推定から、スイング速度の増加分を考慮に入れても、インパクト効率の減少率の方が大きく、結果的に打球速度が減少すると推定されたことから、**Nathan et al.** は打球速度に関するコルクバットの効果を否定した。

2.3.4 バットの支持方法がパフォーマンスに与える影響

Weyrich et al. (1989) は、木製バットの場合にはグリップの強さが打球速度に影響しなかったものの、金属バットでは万力で固定されたグリップの方が打球速度が大きくなったと報告した。一方で、**Brody (1990)** はインパクト時のグリップの堅さが、打球速度には影響を及ぼさず、恐らくインパクトまでのバット速度とバットの位置制御に影響すると主張している。そこで、見解の違いに関する詳細を、異なるバットの支持方法における、バットのインパクト位置に対する **Bounce factor** と反発係数の関係として図 1-15 に示した。**Bounce factor** と反発係数は、異なる 2 つのピボット点と、フリーで吊るされた場合とで比較される。**bounce factor (q)** は、グリップがどのように支持されるかには依存しないが、反発係数は支持方法の影響をわずかに受ける。しかしながら、支持方法の違いによる反発係数の差は、特に反発係数が最大となるスイートスポット付近で最も小さかった。しかしながら、支持方法による反発係数の変化は、バットの振動に関して繊細なポイントである。インパクトによって生成された屈曲波は **0.6ms** でグリップまで伝わるため、反射波がグリップ端からインパクトポイントへ戻る前にボールは弾む (**Cross 1998a**)。さらに、屈曲波によるエネルギーは、グリップを強く保持した場合には短い時間で減衰するが、ボールには影響しない (**Cross 1998a**)。また、**bounce factor** はボールが弾むポイント付近のバット

の特性のみに依存するため、グリップ側のバットの特性には依存しない。また、前述したように、反発係数は衝突によって失われたエネルギーの割合に依存する。振動は、エネルギーを消費するために作用するが、並進や回転のエネルギーは単純にボールからバットまで転送されたエネルギーであり、衝突の結果失われるものではない。このため、もし打者がインパクト直前にバットを手から放したとしても、打球はあたかもバットを手でグリップしているかのように振る舞うだろうとされる (Brody 1990)。以上より、衝突後のボールの特性は、バットがフリーであるかグリップされているかに依存しないと結論付けられることが多い (Cross 1999a, Nathan 2000)。

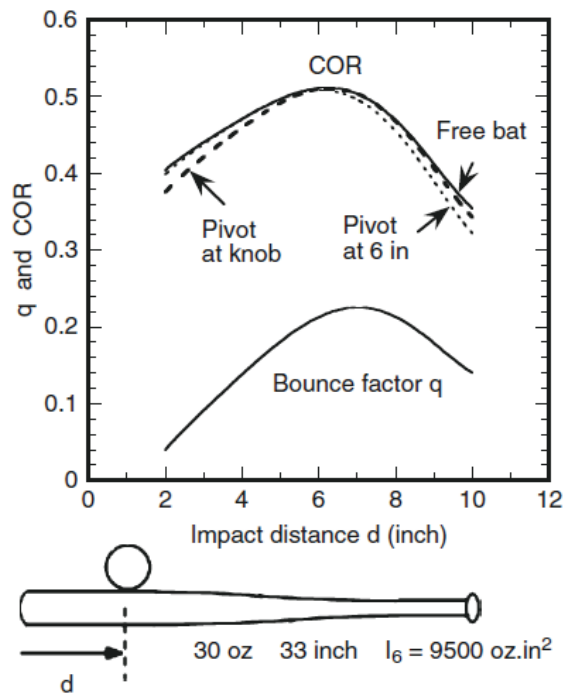


図 1-15 3種の異なるバットの支持方法における、バットの先端からインパクト位置までの距離 (b) に対する Bounce factor (q) と反発係数の関係。バットの支持方法は、それぞれ①フリー、②グリップエンドを中心にピボット固定、③グリップエンドから 15.24cm(6 インチ) を中心にしたピボット固定である。Cross 2011 を引用。

2.3.5 バットを變形する物体として捉えた研究

ここまでは、バット長軸に沿ったインパクト位置と反発係数の関係を除き、剛体近似によるインパクトモデルを用いてボールとバットの運動を検討してきた。一方で、理論式によって妥当な値が導かれるのは、バットの振動による影響が最も小さくなるスイートスポットでのインパクトに限定される (Nathan 2000)。そこで、Van Zandt (1992) は、梁理論を適用することでバットを柔軟な物体として扱い、衝突に関する振動問題に取り組んだ。Van Zandt (1992) の研究は非常に発展的なものであったが、振動モードの節から外れたインパクトでは打球速度の予測値に対する妥当性が低くなるという欠点がみられた。その後、Cross (1999a) や Nathan (2000) が、Van Zandt のモデルを改善させる形で梁理論の解法を与えた。

2.4 斜め衝突

2.4.1 基礎物理

図 1-16 で示すような野球の打撃で生じる斜め衝突を検証した研究を概説する前に、平面への斜め衝突に関する研究から確認する。堅い表面に対するボールの斜め衝突を扱った代表的な研究は、とりわけ衝突する 2 物体間の摩擦に焦点が置かれており、Garwin (1969) のモデルと Brody (1984) のモデルに大別される。Garwin はスーパーボールを対象とし、Brody はテニスボールを対象として分析している。両者のモデルは異なっており、Garwin はボールの接触点の速度が、接線方向・法線方向ともに逆転されることを示唆しており、両方向とも完全に弾性であることを仮定している。一方、Brody のモデルは、法線方向においては非弾性的、接線方向においては完全非弾性衝突となる可能性を示唆している。その場合には、接触点は滑らず静止し、ボールはインパクトの間に回転し始める。

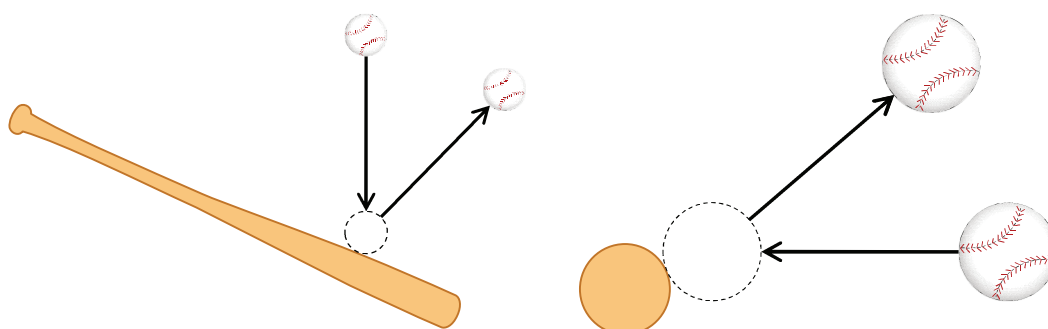


図 1-16 野球の打撃で生じる斜め衝突

図 1-17 で示すようなトップスピンによる斜め衝突で、どのような場合にグリップし、どのような場合に滑るのかを Cross (2003a, 2005b) の報告に基づいて確認する。まず (a) のようなボール中心の接線方向への移動速度が接触面の速度よりも大きかった場合には、摩擦力がボールの進行方向とは反対向きに作用し、ボールは表面上を滑る。これに対し、

(b) のようなボール中心の接線方向への移動速度と接触面の速度が等しい場合には、摩擦力がボールの進行方向とは反対向きに作用し、ボールは表面上をグリップする。そして、(c) のようなボール中心の接線方向への移動速度が接触面の速度よりも小さかった場合には、摩擦力がボールの進行方向と同じ向きに作用し、ボールは表面上を滑る。また、物体が表面上を滑るかどうかは、図 1-18 で示すような摩擦円錐から確かめられる。摩擦力 (F_F) と垂直抗力 (F_N) からなる角度 θ (摩擦係数 μ によって決定される) の合力 (F) を、 F_N 周りに回転させると、その作用線は円錐形となる。これを摩擦円錐と呼び、作用した力の向きが円錐の内部ならばグリップし、外部ならばスリップする (Sawicki et al. 2005)。以上の事象を含め、斜め衝突に関する基礎研究は、これまでさまざまなボールを用いて行われている (Maw et al. 1976, Maw et al. 1981, Lewis and Rogers 1988, Smith 1991, Cross 2003a, Goodwill and Haake 2004, Arakawa et al. 2006)。

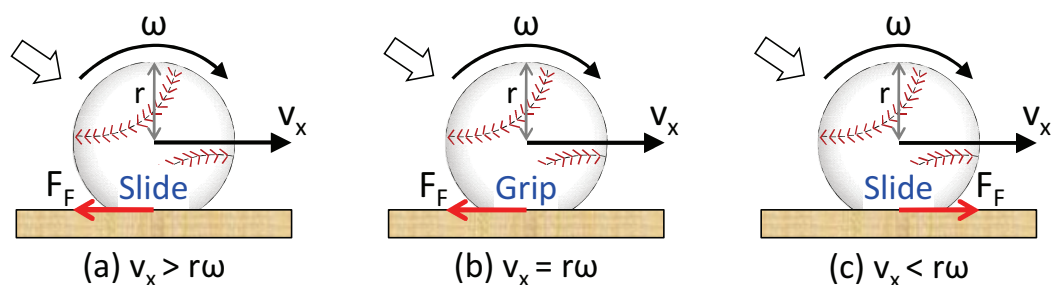


図 1-17 ボールが表面に斜め衝突した時の 3 種の挙動。(a) ボール中心の接線方向への移動速度が接触面の速度よりも大きかった場合、摩擦力がボールの進行方向とは反対向きに作用し、ボールは表面上を滑る。(b) ボール中心の接線方向への移動速度と接触面の速度が等しい場合、摩擦力がボールの進行方向とは反対向きに作用し、ボールは表面上をグリップする。(c) ボール中心の接線方向への移動速度が接触面の速度よりも小さかった場合、摩擦力がボールの進行方向と同じ向きに作用し、ボールは表面上を滑る。Cross (2005b) を改編。

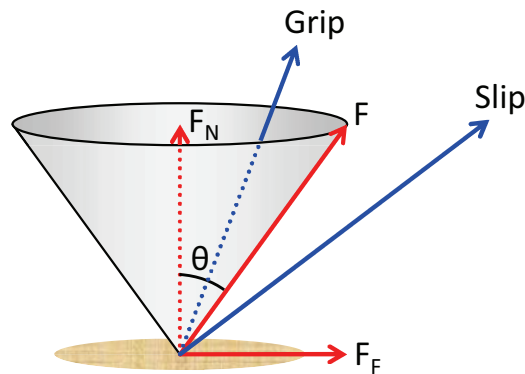


図 1-18 表面から受ける力の合力と Grip-Slip の関係. 摩擦力 (F_F) と垂直抗力 (F_N) からなる角度 θ (静止摩擦係数 μ によって決定される) の合力 (F) を, F_N 周りに回転させてできる円錐を摩擦円錐と呼び, 作用した力の向きが円錐の内部ならばグリップし, 外部ならばスリップする.

ボールとバットの短軸断面上の斜め衝突の関係をみていく. 図 1-19 に示されるように, ボールは速度 v_1 , 角速度 ω_1 で入射し, 速度 v_2 および角速度 ω_2 で跳ね返る. バットの表面に対する法線を基準として入射角は θ_1 , 反射角は θ_2 で表される. x 軸が接触面と平行となるような $x - y$ 座標系において, 接触面に平行な速度成分と垂直な速度成分は, それぞれ図 1-19 に定義される. これらの成分は, ボールの質量中心の速度を指す. 同様に, 衝突後のバットは速度成分 V_{x2} , V_{y2} によって跳ね返される. 衝突前のバットは静止状態を仮定しているため, y 軸方向の反発係数は次式によって表される.

$$e_y = \frac{v_{y2} - (-V_{y2})}{v_{y1}} \quad (56)$$

衝突後におけるバットの y 成分の速度 (V_{y2}) を左辺に移行させる.

$$V_{y2} = e_y v_{y1} - v_{y2} \quad (57)$$

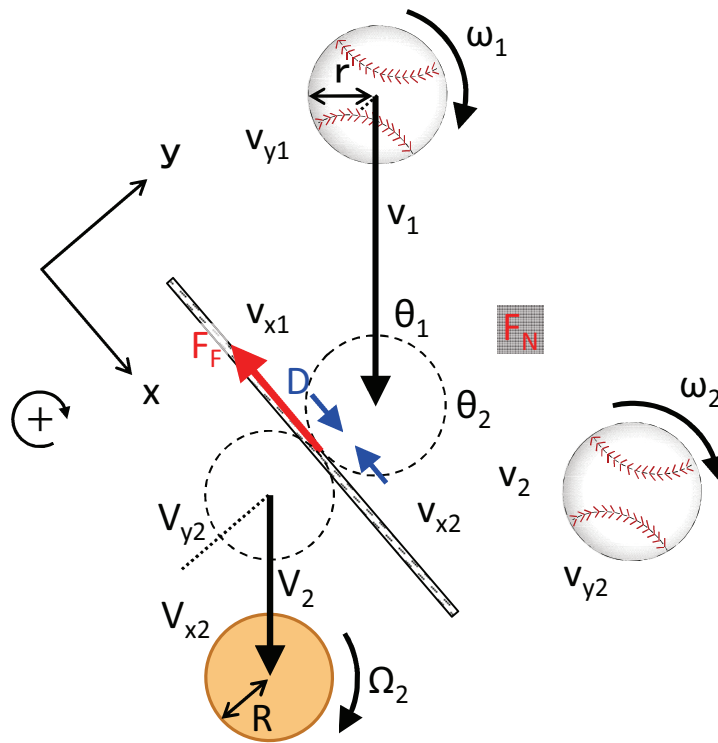


図 1-19 静止状態を仮定したバットのインパクト平面に対する回転を伴ったボールの斜め衝突. Cross and Nathan (2006)を改編.

衝突によってボールには垂直抗力 $F_N = m dv_y/dt$ と、摩擦力 $-F_F = m dv_x/dt$ が作用する.

従って、運動量と力積の原理より、ボールに作用する垂直抗力と摩擦力の時間積分は、次式によって表される.

$$\int F_N dt = mv_{y2} - (-mv_{y1}) \quad (58)$$

$$-\int F_F dt = m(v_{x2} - v_{x1}) \quad (59)$$

バットには同等の力が反対方向に作用する. インパクトポイントにおける有効質量が M_e で表されるならば, $-F_N = M_e dV_y/dt$, $F_F = M_e dV_x/dt$ となる. 従って, バットのインパクトポイントに作用する垂直抗力と摩擦力の時間積分は, 次式によって表される.

$$-\int F_N dt = -M_e V_{y2} \quad (60)$$

$$\int F_F dt = M_e (V_{x2} - R\Omega) \quad (61)$$

式 (58) (60) は, 変形させることで次のように書き換えられる.

$$V_{y2} = \frac{m(v_{y1} + v_{y2})}{M_e} \quad (62)$$

式 (57) を, 式 (62) に代入する.

$$\begin{aligned} \frac{m(v_{y1} + v_{y2})}{M_e} &= e_y v_{y1} - v_{y2} \\ v_{y2} \left(1 + \frac{m}{M_e}\right) &= v_{y1} \left(e_y - \frac{m}{M_e}\right) \\ \frac{v_{y2}}{v_{y1}} &= \frac{e_y - \frac{m}{M_e}}{1 + \frac{m}{M_e}} \end{aligned} \quad (63)$$

Collision efficiency (e_A) は, バットが初め静止状態ならば式 (30) で示されたように, $e_A = v_{y2}/v_{y1}$ によって表される. 従って式 (63) は, 次のように表される.

$$e_A = \frac{e_y - \frac{m}{M_e}}{1 + \frac{m}{M_e}} \quad (64)$$

接線方向 (x) の跳ね返り速度は, ボールとバット間の摩擦や弾性特性に依存するため, 計算することが難しい. 摩擦力は $F_F = \mu F_N$ によって算出される. ここで, μ は滑り摩擦係数となる. ボールが表面をグリップするならば, 摩擦力は静止摩擦に起因するが, F_F と F_N の間には単純な関係は存在しない. しかしながら, 摩擦の影響は次式によって定義され, 接線方向の反発係数 (e_x) の面から記述することができる (Cross 2002b, Cross 2005b, Cross and Nathan 2006, Cross 2010b).

$$e_x = -\frac{v_{x2} - r\omega_2 - (V_{x2} - R\Omega)}{v_{x1} - r\omega_1} \quad (65)$$

式 (30) で示したように, 衝突後のバットの運動を無視することによって, 接線方向の反発係数も同様に単純化される. 従って, 接線方向における見掛けの反発係数 (e_T) は, 次式に

よって表される.

$$e_T = -\frac{v_{x2} - r\omega_2}{v_{x1} - r\omega_1} \quad (66)$$

低速衝突の場合, ボール・バット間に作用する力は本質的にはインパクトポイントの中心から作用し, ボールの角運動量は衝突前後で保存される. しかしながら, テニスボールを高速で衝突させた場合には, 角運動量は保存されない (Cross 2003a). この現象は, 垂直抗力の作用線がボールの質量中心を通らないために生じるものであり, 図 1-19 の距離 D によって説明される. 角運動量と角力積の関係より,

$$r \int F_F dt - D \int F_N dt = I \frac{d\omega}{dt} \quad (67)$$

球の慣性モーメントは, $I = \alpha mr^2$ で表されることから,

$$r \int F_F dt - D \int F_N dt = \alpha mr^2 (\omega_2 - \omega_1) \quad (68)$$

$e_A = v_{y2}/v_{y1}$ より, $v_{y2} = e_A v_{y1}$ を式 (58) に代入する.

$$\int F_N dt = m v_{y1} (e_A + 1) \quad (69)$$

式 (69) を式 (68) に代入する.

$$r \int F_F dt - D m v_{y1} (e_A + 1) = \alpha mr^2 (\omega_2 - \omega_1) \quad (70)$$

コンタクトポイントにおける衝突前後のボール速度の x 成分 (v_{p1x} , v_{p2x}) は, それぞれ次式のように表される.

$$v_{p1x} = v_{x1} - r\omega_1 \quad (71)$$

$$v_{p2x} = v_{x2} - r\omega_2 \quad (72)$$

ボールの角速度 (ω_1 , ω_2) を左辺に移行させる.

$$\omega_1 = \frac{v_{x1} - v_{p1x}}{r} \quad (73)$$

$$\omega_2 = \frac{v_{x2} - v_{p2x}}{r} \quad (74)$$

式 (70) に式 (73) (74) を代入する.

$$\begin{aligned}
r \int F_F dt - Dmv_{y1}(e_A + 1) &= \alpha mr^2 \left(\frac{v_{x2} - v_{p2x}}{r} - \frac{v_{x1} - v_{p1x}}{r} \right) \\
\int F_F dt &= -\frac{Dmv_{y1}(e_A + 1)}{r} + \alpha m \{v_{x2} - v_{p2x} - (v_{x1} - v_{p1x})\} \\
\int F_F dt - \alpha m(v_{x2} - v_{x1}) &= -\frac{Dmv_{y1}(e_A + 1)}{r} - \alpha m(v_{p2x} - v_{p1x})
\end{aligned} \tag{75}$$

式 (59) を代入する.

$$\begin{aligned}
\int F_F dt + \alpha \int F_F dt &= -\frac{Dmv_{y1}(e_A + 1)}{r} - \alpha m(v_{p2x} - v_{p1x}) \\
\int F_F dt (1 + \alpha) &= -\frac{Dmv_{y1}(e_A + 1)}{r} - \alpha m(v_{p2x} - v_{p1x}) \\
\int F_F dt &= -\frac{Dmv_{y1}(e_A + 1)}{r(1 + \alpha)} - \frac{\alpha m(v_{p2x} - v_{p1x})}{1 + \alpha}
\end{aligned} \tag{76}$$

x 成分に関するボールの有効質量 (m_{ex}) は, 次式によって与えられる (Cross and Nathan 2006).

$$m_{ex} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} m \tag{77}$$

$$\frac{m}{1 + \alpha} = \frac{m_{ex}}{\alpha} \tag{78}$$

式 (78) を式 (76) に代入する.

$$\int F_F dt = -\frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha} - m_{ex}(v_{p2x} - v_{p1x}) \tag{79}$$

式 (61) の $V_{x2} - R\Omega$ は, バットのコンタクトポイントにおける接線速度であることから,

式 (79) は, 次式のように書き換えられる.

$$\int F_F dt = M_{ex}V_{p2x} \tag{80}$$

式 (81) を式 (80) に代入する.

$$M_{ex}V_{p2x} = -\frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha} - m_{ex}(v_{p2x} - v_{p1x}) \tag{81}$$

式 (65) (66) は, 次式のように書き換えられる.

$$e_x = -\frac{v_{p2x} - V_{p2x}}{v_{p1x}} \tag{82}$$

$$e_T = -\frac{v_{p2x}}{v_{p1x}} \quad (83)$$

式 (82) の V_{p2x} を, 左辺に移行させる.

$$V_{p2x} = e_x v_{p1x} + v_{p2x} \quad (84)$$

式 (83) を式 (84) に代入する.

$$\begin{aligned} V_{p2x} &= e_x v_{p1x} - e_T v_{p1x} \\ V_{p2x} &= v_{p1x}(e_x - e_T) \end{aligned} \quad (85)$$

式 (85) を式 (81) に代入する.

$$\begin{aligned} M_{ex} v_{p1x}(e_x - e_T) &= -\frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha} - m_{ex}(v_{p2x} - v_{p1x}) \\ M_{ex}e_x - M_{ex}e_T &= -\frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha v_{p1x}} - \frac{m_{ex}v_{p2x}}{v_{p1x}} + m_{ex} \end{aligned}$$

式 (71) (83) より,

$$\begin{aligned} M_{ex}e_x - M_{ex}e_T &= -\frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha(v_{x1} - r\omega_1)} + m_{ex}e_T + m_{ex} \\ e_T(m_{ex} + M_{ex}) &= M_{ex}e_x - m_{ex} + \frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha(v_{x1} - r\omega_1)} \\ e_T &= \frac{M_{ex}e_x - m_{ex}}{m_{ex} + M_{ex}} + \frac{1}{m_{ex} + M_{ex}} \cdot \frac{Dm_{ex}v_{y1}(e_A + 1)}{r\alpha(v_{x1} - r\omega_1)} \\ e_T &= \frac{e_x - \frac{m_{ex}}{M_{ex}}}{1 + \frac{m_{ex}}{M_{ex}}} + \frac{D}{r\alpha} \cdot \frac{\frac{m_{ex}}{M_{ex}}}{1 + \frac{m_{ex}}{M_{ex}}} \cdot \frac{v_{y1}(e_A + 1)}{v_{x1} - r\omega_1} \end{aligned} \quad (86)$$

x 成分の recoil factor $r_x = m_{ex}/M_{ex}$ より,

$$e_T = \frac{e_x - r_x}{1 + r_x} + \frac{D}{r\alpha} \cdot \frac{r_x}{1 + r_x} \cdot \frac{v_{y1}(e_A + 1)}{v_{x1} - r\omega_1} \quad (87)$$

なお, バットの x 成分における有効質量 (M_{ex}) は, 次式によって表すことができる.

$$\frac{1}{M_{ex}} = \frac{1}{M} + \frac{b^2}{I_0} + \frac{R^2}{I_z} \quad (88)$$

従って recoil factor (r_x) は, 次のように書き換えられる.

$$r_x = m_{ex} \left(\frac{1}{M} + \frac{b^2}{I_0} + \frac{R^2}{I_z} \right) \quad (89)$$

式 (78) より,

$$r_x = \frac{\alpha}{1 + \alpha} m \left(\frac{1}{M} + \frac{b^2}{I_0} + \frac{R^2}{I_z} \right) \quad (90)$$

ボールを均質な球と仮定すると, $\alpha = 2/5$ が当てはまる. 一方, Brody (2005) によると, 野球ボールの場合 $\alpha = 0.378$ が当てはまるとされる.

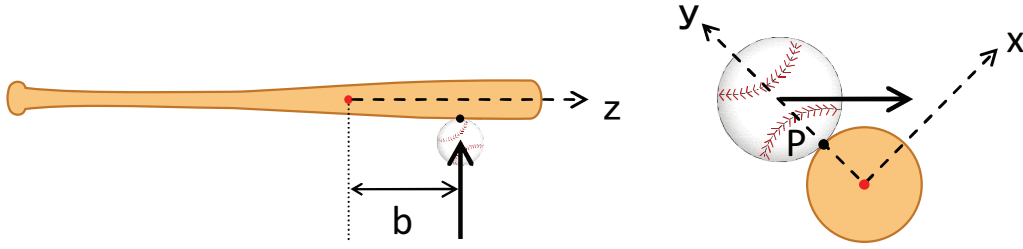


図 1-20 接線方向と法線方向それぞれの見掛けの反発係数 (e_A, e_T) に関連する幾何. 図 1-19 における座標系の原点をバットの質量中心に平行移動させる. ボールとバットのコンタクトポイントを点 P とする.

式 (66) における ω_2 と v_{x2} を, 左辺に移行させる.

$$\omega_2 = \frac{e_T(v_{x1} - r\omega_1) + v_{x2}}{r} \quad (91)$$

$$v_{x2} = r\omega_2 - e_T v_{x1} + e_T r\omega_1 \quad (92)$$

野球ボールの斜め衝突に伴う垂直抗力は, 通常その作用線がボールの質量中心通ると仮定されるため (Cross and Nathan 2006), $D = 0$ となる. 従って, 衝突前後のボールにおける角運動量保存の法則は, 次のように表される.

$$I\omega_1 + mrv_{x1} = I\omega_2 + mrv_{x2} \quad (93)$$

球の慣性モーメントは, $I = \alpha mr^2$ で表されることから,

$$\alpha mr^2\omega_1 + mrv_{x1} = \alpha mr^2\omega_2 + mrv_{x2}$$

$$\alpha r\omega_1 + v_{x1} = \alpha r\omega_2 + v_{x2} \quad (94)$$

$$\alpha r(\omega_1 - \omega_2) = v_{x2} - v_{x1} \quad (95)$$

式 (91) を式 (95) に代入させる.

$$\begin{aligned} \alpha r \left\{ \omega_1 - \frac{e_T(v_{x1} - r\omega_1) + v_{x2}}{r} \right\} &= v_{x2} - v_{x1} \\ \alpha r \omega_1 - \alpha e_T v_{x1} + \alpha e_T r \omega_1 - \alpha v_{x2} &= v_{x2} - v_{x1} \\ \frac{v_{x2}}{v_{x1}} (1 + \alpha) &= 1 - \alpha e_T + \frac{\alpha r \omega_1}{v_{x1}} (1 + e_T) \\ \frac{v_{x2}}{v_{x1}} &= \frac{1 - \alpha e_T}{1 + \alpha} + \frac{\alpha(1 + e_T)}{1 + \alpha} \cdot \frac{r \omega_1}{v_{x1}} \end{aligned} \quad (96)$$

式 (92) を式 (94) に代入させる.

$$\begin{aligned} \alpha r \omega_1 + v_{x1} &= \alpha r \omega_2 + r \omega_2 - e_T v_{x1} + e_T r \omega_1 \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} (1 + \alpha) &= \alpha - e_T + \frac{v_{x1}}{r \omega_1} (1 + e_T) \cdot \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} &= \frac{\alpha - e_T}{1 + \alpha} + \frac{1 + e_T}{1 + \alpha} \cdot \frac{v_{x1}}{r \omega_1} \end{aligned} \quad (97)$$

多くの場合、回転速度に起因するボールの周辺速度よりもボール中心の移動速度の方が大きいので、ボールが表面から斜めに弾むときに回転速度が減少し、 e_x は0.1未満や0に近くなる。その場合、近似的な解法として、 $e_x = 0$ とすることで跳ね返り速度、回転速度、角度を得ることができる (Cross 2013)。また、本節では斜め衝突をバットの短軸断面上の運動として扱ってきたが、前述した理論式はバットの長軸方向に対する斜め衝突へも応用可能と考えられる。しかしながら、打球を左右方向へ打ち分ける「引っ張り」や「流し打ち」に繋がるような、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になく、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 McIntyre and Pfautsch (1982) によるものだけである。

Cross and Nathan (2006) は、バットの短軸方向における斜め衝突について、低速度でボールを衝突させた際の入射角に対するボールの速度や回転数との関係を検討している。その結果、前述した理論式と実測により得られたデータともに、正面衝突のインパクト ($\alpha = 0^\circ$) によって、衝突後のボール速度が最小化され、斜め衝突ほどボール速度が大きくな

っていた (図 1-21). ここで用いられる α は、角度を示す記号であり、慣性モーメントを算出するための係数 α とは異なる. なお、この結果はバットをスイングした際のインパクト位置と打球速度の関係とは反対の傾向となるが (Watts and Baroni 1989, McBeath et al. 2008), 実測により検証された研究はこれまでにない.

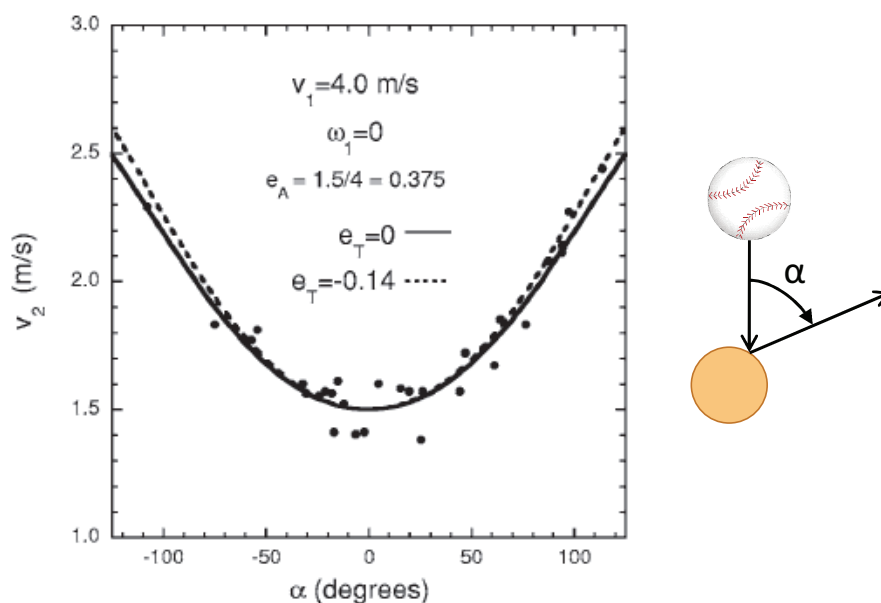


図 1-21 水平面上に保持したバットにボールを 4.0m/s で落下させた際の、散逸角(α)と衝突後のボール速度(v_2)の関係. 実線が接線方向の反発係数(e_T)が 0 の時の理論値で、破線が接線方向の反発係数(e_T)が-0.14 の時の理論値を示す. Cross and Nathan (2006) より引用.

2.4.2 実戦へ応用させた研究

ここまでは、ボールインパクトに関わる物理的要因について理論的にまとめてきた。そこで、最後に打撃パフォーマンスへの直接的な影響を調査した研究を取り上げる。Watts and Baroni (1989) は、ボールインパクトを2次元的に捉え、打球の上下角と回転速度による相互作用から、打球飛距離が最大化されるポイントを調査した(図1-22)。打球の回転速度が高まるほど飛距離が伸び、その際の最適打球角度も低くなっていく傾向が見られた。しかしながら、この図ではインパクトとの相互作用を考慮していないため、打球の回転速度が高まるような斜め衝突では、打球の並進速度が小さくなる(Cross and Nathan 2006)というトレードオフが含まれていない。

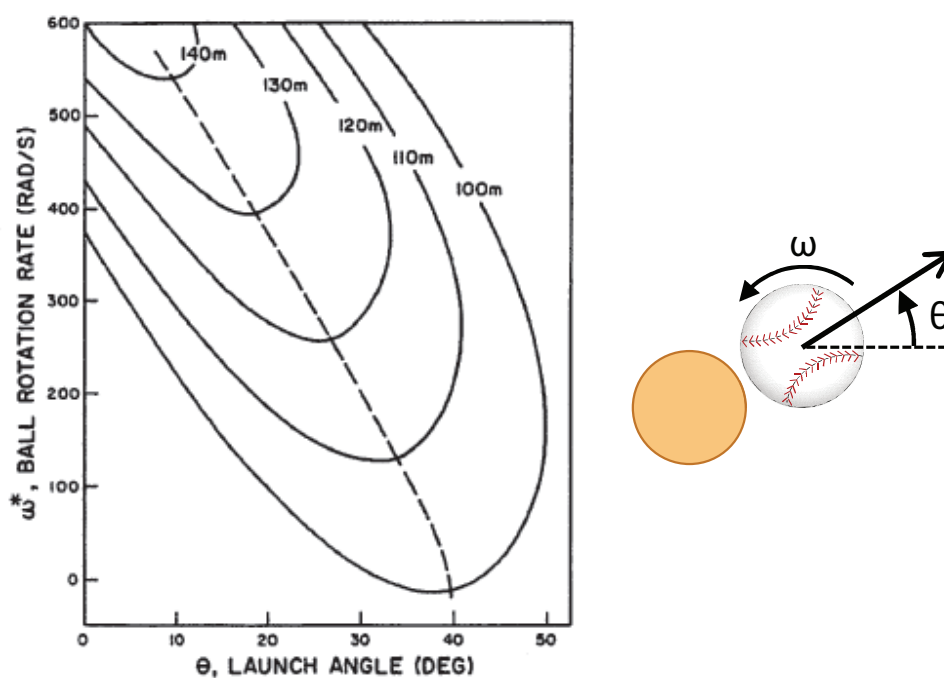


図1-22 打球の回転速度と上下方向における発射角度に対する打球飛距離の関係。破線は、打球飛距離が最大化される各変数の最適値を示している。Watts and Baroni (1989) より引用。

Sawicki et al. (2003) は、42m/s で投げられた直球に対し、インパクトポイントにおけるバット速度が 30m/s であるという条件のもと、ボールとバットの断面中心の垂直距離 (E) が 2.65cm となるようなインパクトポイント、かつ 9° ($\phi : 0.159 \text{ rad}$) のアップスイングでインパクトさせるようなスイング軌道 によって、134.8m の最長飛距離が獲得できることを報告した (図 1-23)。なお、打球はこのインパクトによって上向き 26.3° の方向に 44.3m/s の速度で放たれることになる。一方で、McBeath et al. (2008) は、 $\phi = 0$ となるようなレベルスイングの場合には、 $E = 1.9\text{cm}$ のインパクトによって打球飛距離が最大化されることを報告しており、この結果は Sawicki et al. の報告よりもわずかに小さかった。何れにしても、研究間で約 7mm の幅があることは、バットの短軸上のインパクト位置には 1 ミリの精度を必要としないことを示す。

また、Sawicki et al. (2003) は直球 (バックスピン) よりもカーブ (トップスピン) を打撃した方が、インパクト時にボールの回転を逆転させる必要がないために飛距離が伸びると報告している。この報告に対し、Adair (2005) は自身の主張 (最適発射角 35°) を元に、Sawicki et al. の論文を批判している。この報告に対し、さらに Sawicki et al. (2005) は、Adair の主張がニュートンの法則に基づいていないと主張している。なお、Chase et al. (2008) は、Sawicki et al. (2003) の研究を発展させる形で、競技者のレベル別に最適なスイングを導き出している。

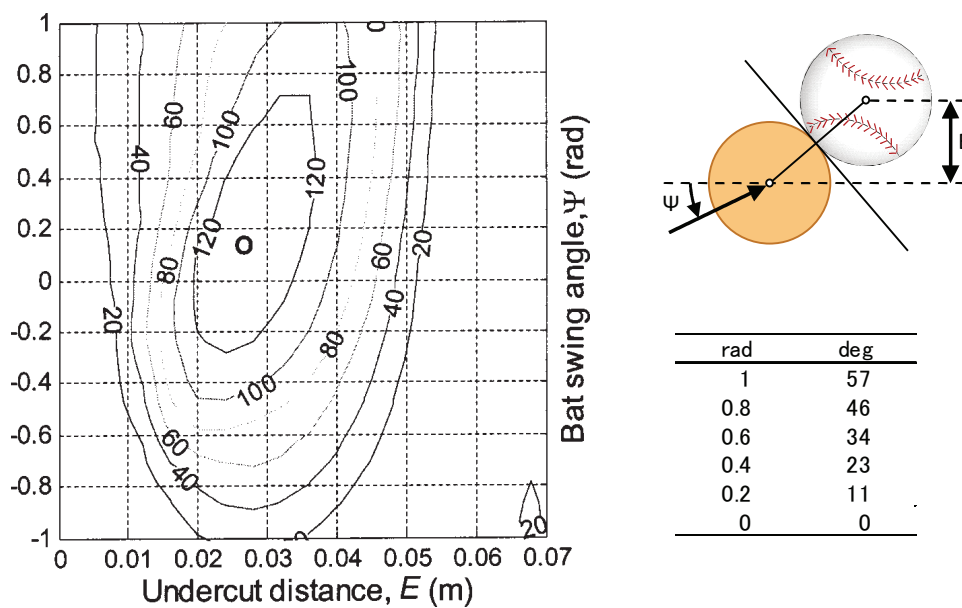


図 1-23 アンダーカット距離(E)と、スイング角(Ψ)に対する打球飛距離の関係。打球飛距離を20m間隔に等高線で記しており、点Oは、最長飛距離(134.8m)を記録したポイントを示す。Sawicki et al. (2003) より引用。

Nathan (2012) は、MLB で 2007 年から導入されているフィールド測定システム (HITf/x) を用いて、試合の打撃データから打球の速度・角度と打球飛距離の関係を調査した。インパクト直後の打球速度を4種類にカテゴリー分けし、速度ごとに打球飛距離が最大化される打球の上下角を調べたところ、上向き 30° 前後であったことを報告している(図 1-24)。そして、ホームランを放つために必要な飛距離を 300ft (91m) とすると、この図から少なくとも 85mph (137km/h) 以上の打球速度が必要といえる。

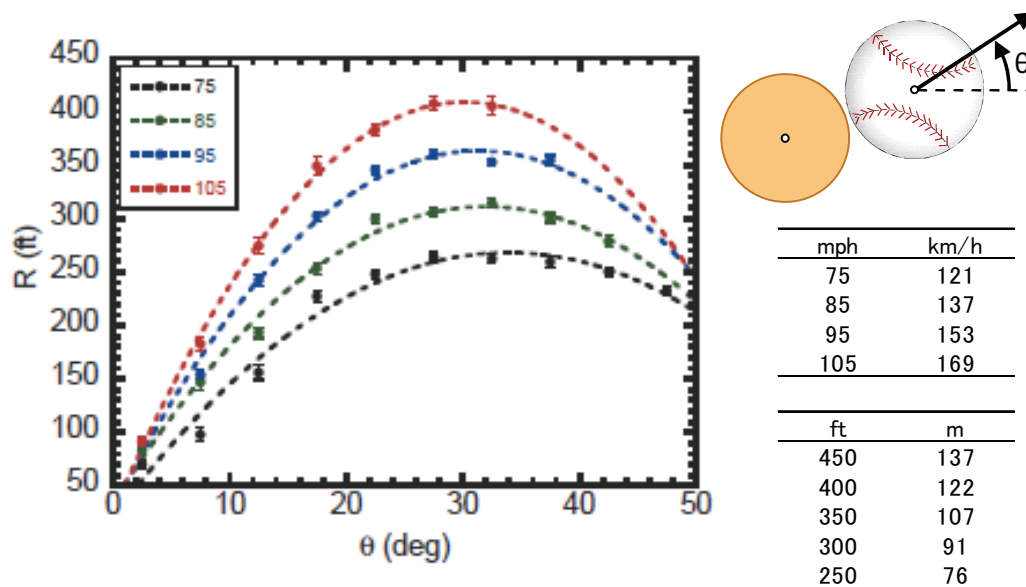


図 1-24 打球の上下方向の発射角度 (θ) と打球飛距離 (R) の関係。打球の速度 (mph) によって色が分かれており、各プロットは角度毎における打球飛距離の中央値を示し、破線は各プロットから得られた近似曲線を示している。Nathan (2012) より引用。

Sawicki et al. (2003) は、インパクト直前におけるバットの長軸まわりの角速度（ローリング角速度： ω_{B0} ）と打球飛距離との関係を調査した（図 1-25）。これまでの研究では、バットのローリングは重要ではないものとして捉えられてきたが（Kirkpatrick 1963）、理論的には、トップスピン方向のローリングによって、打球に付加的なバックスピンを与えられ、飛距離が伸びると考えられる。しかしながら、Sawicki et al. (2003) の報告では、ローリング角速度の $1000^\circ / \text{s}$ の増加が、 0.55m の飛距離の増加にとどまっていたとされる（図 1-24）。そして、Sawicki et al. (2003) は、バットのローリングによる飛距離の伸びは非常に小さく、ローリング角速度を高めようとした際の不自然な動作に伴う代償が得られる利益より大きくなるため、ローリング角速度を高めることが飛距離を伸ばすための方策として適していないと指摘している。しかしながら、この検証結果は剛体モデルから得られ

たものであり，妥当性には疑問が残る．

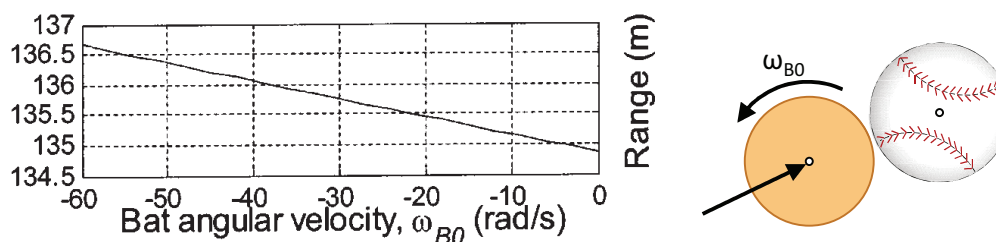


図 1-25 バット長軸回りの角速度（ローリング角速度）と打球飛距離の関係．バットのローリングは，スイングに対してトップスピン方向へ回転するほど，値が小さく（マイナス側）なる．Sawicki et al. (2003) より引用．

2.5 まとめと本研究との関連

ボールとバットの形状は球と円柱に近似されるが，両者の衝突は本質的には質量の異なる2つの点としてモデル化できる．従って，ここまでに記述した理論式を用いることによって，アウトプットとなる打球の速度や角度や回転速度は，インプットを測定することによって推定することが可能となる．前述したように，Watts and Baroni (1989) や Sawicki et al. (2003) は，ボールとバットを2次元剛体によりモデル化し，打球飛距離が最大となるインパクト特性を理論的に求めている．しかし，剛体モデルによって得られた値には，妥当性に関して疑問が残る．一方，2000年代に入り，ボールとバットを弾性モデルとして解を求めるような有限要素法を用いた研究手法が増えてきた (Smith 2001, Shenoy et al. 2001, Nicholls et al. 2005b, Smith and Duris 2009, Rezaei et al. 2011, Ravindra et al. 2011, Burbank and Smith 2012)．これにより，アウトプットをより真値に近づけることが可能となった．しかしながら，これらの研究は道具としてのバットやボールの性能を評価しているもので，選手個々の特徴から技術向上の方策を図ったものではない．従って，狙った方向に鋭い打球を放つための方策を，実際の打撃におけるボールインパクトから，より詳細に分析する必要がある．

第2章 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

1. 諸言

野球の試合では、相手チームより多くの点を奪うことがチームの勝利へと繋がるため、打者の役割が試合の行方を大きく左右する。中でも、長打やホームランは単打に比べ複数の得点を一度に獲得できる可能性が高くなるため、試合展開のなかで有効打となることが多い。典型的なホームランバッターの放った打球は、大きな弧を描くように飛翔し、落下点までの水平距離（飛距離）が長いことが特徴である。また、ホームランの数は少ないが長打の多い打者は、外野手の間を抜く高速度・高回転で飛翔する打球を低い弾道で放つことが特徴である。この大きな移動速度と大きな回転速度の両要因が相俟った打球は運動エネルギーが大きく、マグナス効果によって生じる揚力の影響を強く受けるため、低い弾道で伸びる打球となり得る。しかし、このような打球を放ったとしても、飛距離があまりに短く地面を這うような打球では、ボールがバウンドする度に地面から摩擦抵抗を受けることにより減速する。このため、打球の特徴に違いはあれ、ホームランに限らず外野手の間を抜くような長打を放つためには、大きな運動エネルギーに加えて一定以上の飛距離が必要となる。

打球の飛距離を決定する力学的要因は、打球の初速度（打球速度）、発射角度（打球角度）、回転速度（打球角速度）となり（Watts and Baroni 1989, Adair 2002）、打球の運動エネルギーを決定する要因は打球速度、打球角速度となる。さらに、これらの打球パラメータは、①投球されたボールのインパクト直前における並進速度および角速度によって定量できる投球特性、②インパクト時におけるボールとバットの位置関係を表すインパクトパラメータ、③ボールインパクト直前のバットの並進速度および角速度によって表されるスイング特性、④質量、慣性モーメント、材料特性等によって表されるバットの力学的特性の4要

因によって規定される。このうち、打者の打撃技術によって決定される要因は、インパクトパラメータとスイング特性である。

インパクト時のボールとバットの位置関係は、バットの長軸上における芯からの距離とバットの短軸上のインパクト位置に分類される。ここで、一般にバットの『芯』あるいは『スイートスポット』は、バットの慣性パラメータおよび打者のグリップ位置により決定される撃心 (center of percussion) と呼ばれる位置や、振動曲げモードの節に当たる位置を意味することが多く (Brody 1986, Cross 2004, Van Zandt 1992, Cross 1998, Vedula and Sherwood 2004), この位置でインパクトすることによって、バットの持つ運動エネルギーをボールへと効率よく伝達することができる。また、インパクト時におけるボールとバットの位置関係を接触面に垂直な断面で観察した場合に、それぞれの重心点を結んだラインとバットのスイング方向、および投球されたボールの進行方向が一致したときに直衝突となり、双方がインパクト前に並進運動をしていた場合は、この条件下で最大の打球速度が得られる。これらより、打球の飛距離、および運動エネルギーの規定要因は、インパクト時のバット速度だけではなく、バットの長軸上における芯からの距離と短軸上のインパクト位置にも大きな影響を受けると言える。

スイング特性は、バットのインパクト位置における速度と長軸回りの回転 (ローリング) 速度で定量できる。しかしながら、前者はグリップエンドからボールのインパクト位置までの距離の影響を受けることから、打者のスイング特性を純粹に表す指標とは言い難い。先行研究ではバットヘッドの移動速度 (ヘッド速度) を指標として用いることが多く、この指標が飛距離に強い影響を与えることが報告されている (Sawicki et al. 2003)。ローリング角速度については、これを増加させると、インパクト時の摩擦によって打球にさらなるバックスピンを与えるため、飛距離が伸びると考えられる。この影響を分析した

Sawicki et al. (2003) は、バットのローリングによる飛距離の伸びは非常に小さく、ローリング角速度を高めようとした際の不自然な動作に伴う代償が得られる利益より大きくなるため、ローリング角速度を高めることが飛距離を伸ばすための方策として適していないと指摘している。しかし、この知見はボールとバットを 2 次元剛体としてモデルした数値シミュレーションにより得られたものであり、ローリング角速度と飛距離との関係を実測により検討したものではない。そのため、上記の知見の妥当性には疑問が残る。

打球飛距離を生み出す要因について検討した研究 (Watts and Baroni 1989, Nathan 2008) の多くは、各要因との関係をシミュレーションによって算出しており、実測による選手のデータが乏しい。そこで本研究は、野球の打撃動作における打球の飛距離と運動エネルギーを決定する打球の特性、およびそれらを生み出すインパクトを含むスイングの特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、東京六大学野球リーグに所属する選手 13 名（身長 175.5 ± 5.5 cm, 体重 74.1 ± 5.3 kg）で、このうち右打者 8 名, 左打者 5 名であった。本実験の実施にあたり、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会による承認を得た。また、被験者には本研究の目的や実験方法などを説明し、実験参加への書面による同意を得た。

2.2 実験試技

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、野球場にてフリーバッティングを行わせた。投球はホームベースより規定の距離（18.44 m）離れた地点から、ドラム式マシンを用いて、硬式野球ボール（半径 0.036 m, 質量 0.148 kg）を平均速度 26.7 m/s で投じた。この時、全ての被験者において投球の発射位置、発射角度、および初速度が一定になるよう設定した。これを、各被験者に全力でセンター方向へ打ち返すよう指示を与えた。打球飛距離が 60 m 以上、且つセンターラインを中心に左右各 15 度の範囲内に打球が放たれ、被験者自身が満足のいく打撃であったと自己評価した試技を成功試技とした。これら成功試技を各被験者 5 試技分得られるまで実験を行った。この時の打球飛距離 (D_i) はメジャーを用いて実測した。成功試技を 5 試技分収集するまでに要した平均試行数は 14 ± 5 試技であった。

2.3 データ収集

打撃動作中のバットとボールの撮影は、1 台の超高速カメラ（Vision Research 社製、Phantom663）を用いて、撮影速度 2500 fps, 露光時間 0.2 ms で行なった。カメラは打者

が正対する方位である側方 22.5m 地点（右打者の場合，ホームベースから左バッターボックスへ向かう方向）に設置した．また，全ての実験試技において使用した硬式用木製バット（Wilson 社製，JHG06，0.84 m，0.907 kg，グリップエンドから重心位置までの距離：0.578 m）のグリップエンドに 3 軸角速度センサ(DTS 社製，ARS-K12，サンプリング周波数 1000 Hz) を装着した．センサより得られたアナログデータは，被験者の腰に装着した無線式データロガーシステム（S&ME 社製，FA-DL3000）を用いて A/D 変換し，コンピュータに取り込んだ．

2.4 データ処理

ビデオ映像より得られたデータは 2 次元分析に必要なデジタル点を正確に判断できる映像を各被験者 1~3 球，計 27 試技収集し，その全てを分析対象とした．角速度データについては成功試技の 65 試技（13 被験者×5 試技）を分析対象とした．なお，全ての変数の記号および定義を表 2-1 に示した．

ボールとバットの挙動は超高速カメラによる映像から画像解析ソフトウェア（Siliconcoach 社製，Siliconcoach Pro7）を用いて，本塁中心からセンターに向かう鉛直面に分析対象となる点を投影したときの鉛直上下動ならびに水平動として分析した．ボールのデジタル位置はボールの断面中心とし，バットのデジタル位置はバットヘッドの中心点とした．また，この時のデジタル位置の 2 次元座標を 2 次元実長換算により取得した．2 次元分析法により遠近差を無視することによって生じる計測誤差は $\pm 2.3\%$ であった．本実験より得られる全ての角度および角速度の値は，反時計回り(x 軸)の回転を正の値とした（図 2-1）．

インパクト直前の投球速度 ($V_{\text{ball/pre}}$)，投球角度（投球の速度ベクトルと水平線とのなす

角度： θ), バットのヘッド速度 (V_{head}), スイング角度 (バットヘッドの速度ベクトルと水平線とのなす角度： ϕ) はインパクト直前 5 フレーム (0.002 秒間) におけるボールの断面中心, 或いはバットヘッドの中心点の変位から算出した. 同様にして, インパクト直後の打球速度 ($V_{\text{ball/post}}$), 打球角度 (ϕ) はインパクト終了後 5 フレームのボールの変位から算出した. インパクト前後のボールおよびバットの角度は速度ベクトルと水平線とのなす角度とした.

バットのグリップエンドに装着したセンサが計測したバットの長軸回りの角速度 ($-\omega_z$) をローリング角速度 (ω_{rolling}) と定義した (図 2-2). ローリング角速度はスイングに対してバックスピン方向への回転を正とした. 計測したローリング角速度の生データを 4 次の Butterworth 型ローパスフィルターによって平滑化した. なお, 遮断周波数は残差分析法 (Winter 1990) により最適遮断周波数を決定した (ローリング角速度 27.8 Hz).

ボール角速度は, 図 2-3 中に示した 3 軸角度測定装置を用いて推定した. まず, 装置の上方に固定カメラを設置し, 装置上のボールを撮影した. 装置上のボールの方位を調節し, 固定カメラに映し出されたボールの縫い目と打撃実験の画像におけるボールの縫い目を合致させた. このとき, 装置にボールを固定するためのアームがボールの回転軸と一致するよう留意した. 次に, 撮影画像を 5 フレーム (0.002 秒) 進め, この画像におけるボールの縫い目の見え方と合致するよう装置上のボールを手動で回転させた. 投球, および打球の回転方向は進行方向に対しほぼバックスピンの回転のみであったことから, 撮影画像に垂直な軸まわりの回転角度のみを読み取り, その値からボールの角速度を算出した. この作業を繰り返すことによって, 5 フレームごとの角速度を記録した. Watts and Baroni (1989) は, 飛翔するボールが着地するまでに減少する角速度はわずか (約 1.5%) であり, 無視できる範囲の値であると指摘している. このため, インパクト前約 60 フレーム (0.024 秒) に

おける角速度の平均値を，その投球の角速度 ($\omega_{\text{ball/pre}}$) とした．同様に，インパクト終了後約 47 フレーム (0.019 秒) の平均角速度を打球の角速度 ($\omega_{\text{ball/post}}$) とした．また，インパクト直後におけるボールの並進・回転を合わせた運動エネルギー ($E_{\text{ball/post}}$) を次式より算出した．

$$E_{\text{ball/post}} = \frac{1}{2} m_{\text{ball}} V_{\text{ball/post}}^2 + \frac{1}{2} I_{\text{ball}} \omega_{\text{ball/post}}^2 \quad (1)$$

ここで， m_{ball} はボールの質量 (0.148 kg)， I_{ball} はボールの慣性モーメント ($7.7 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$) とした．

インパクト時におけるボールとバットの断面中心を結んだ線と水平線とのなす角度を衝撃線角度 (ζ) とした．また，バットのグリップエンドからボールのインパクト位置までの距離 (r_{imp}) をビデオ画像から計測した．ボールとバットの衝突時間 (t_c) は，画像上でボールとバットが接触するフレーム数をカウントすることにより算出した．しかし，本実験で行った撮影速度 (2500 fps) ではフレーム数が少なく，衝突時間の測定誤差が生じやすくなる．このため，まずボールとバットが衝突しているか否かの確認が困難なフレームを含めたフレーム数のカウントを行い，次に確実に衝突していると判断できたフレームのみをカウントした．そして，両者の平均値をボールとバットの衝突時間とした．

表 2-1 各変数の記号と定義

$V_{\text{ball/pre}}$: The velocity of the pitched ball immediately before impact
θ	: The angle from horizontal of the pitched ball immediately before impact
$V_{\text{ball/post}}$: The velocity of the batted ball immediately after impact
ϕ	: The angle from horizontal of the batted ball immediately after impact
V_{head}	: The velocity of the bat head immediately before impact
ψ	: The angle from horizontal of the bat swing immediately before impact
r_{imp}	: Length from grip end to impact point
ζ	: The angle from horizontal of the line of impact
$\omega_{\text{ball/pre}}$: The angular velocity of the ball before impact
$\omega_{\text{ball/post}}$: The angular velocity of the ball after impact
ω_{rolling}	: The angular velocity of the bat around the long axis (Rolling angular velocity)
m_{ball}	: Ball mass
I_{ball}	: Moment of inertia of ball
r_{bat}	: Bat length
t_c	: Duration of contact between ball and bat
$E_{\text{ball/post}}$: The kinetic energy of the ball immediately after impact
D_f	: Flight distance

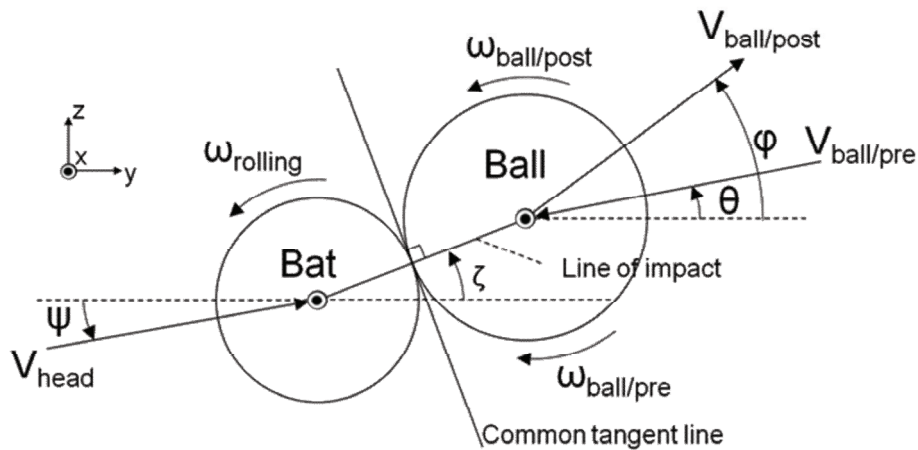


図 2-1 変数を定義するためのボール・インパクトの図. 角度と角速度は反時計まわりを正とした.

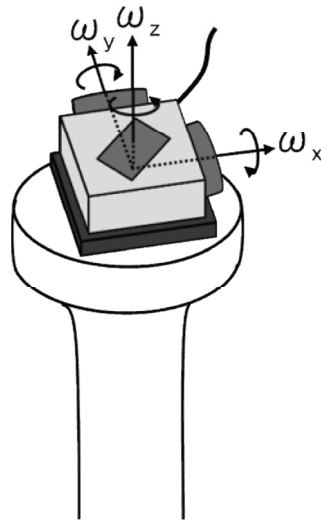


図 2-2 バットのグリップエンドに装着した角速度センサ

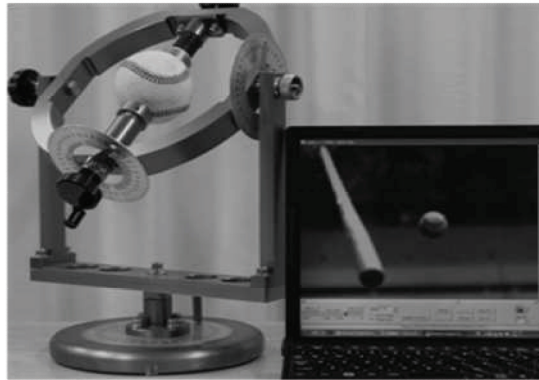


図 2-3 ボールの回転数を計測するためのジャイロスコープ

2.5 統計処理

各被験者のスイング特性を分析するため、ローリング角速度は、各被験者につき 5 試技分のデータ平均値を各被験者の代表値とした。また、被験者間のばらつきは標準偏差で示した。さらに、ビデオ画像が収集できた 27 試技におけるローリング角速度を含んだ全ての変数を平均値 \pm 標準偏差、および最大値、最小値で示した。

スイング特性、インパクトパラメータと打球特性との関連を分析するため、全 27 試技の打球飛距離と打球の運動エネルギーに対するヘッド速度、ローリング角速度、スイング角度、インパクト位置、衝撃線角度、インパクト直後の打球速度、打球角度、打球の角速度との関係を Pearson の積率相関係数を用いて検定を行った。この際、有意水準を 5% 未満とした。また、打球飛距離に関連のあるスイング特性を抽出するため、打球飛距離を従属変数、スイング特性（ヘッド速度、ローリング角速度、スイング角度）を独立変数として重回帰分析を行った。同様に、打球の運動エネルギーに関連のあるスイング特性を抽出するため、打球の運動エネルギーを従属変数、スイング特性を独立変数として重回帰分析を行った。独立変数の選択はステップワイズ法を用い、投入する F の確率を 0.05 以下、除去する F の確率を 0.1 以上とした。

3. 結果と考察

3.1 投球とスイング

投球速度は 26.7 m/s の平均値に対して変動係数が 5 %程度であった (表 2-2) ことから、ほぼ一定の速度で投射されたものと考えられる。また、投球角度の 1 標準偏差が 0.03 rad (変動係数 20 %), 投球角速度の 1 標準偏差が ± 2.7 rad/s (変動係数 12 %) であったことは、投球のコンディションが概ね一定であったことを示す。したがって、本研究で観察された試技間の打球の変動は、投球条件の差異よりもスイングおよびインパクトコンディションの変動に起因すると考えられる。

インパクト時のスイング特性については、ヘッド速度の変動係数が 10 %未満であり (表 2-3), ばらつきが小さかった。これは、競技レベルの高い大学生選手がフリーバッティングにおいて自己評価の高い打球を打った際のバット速度には、試技間だけでなく被験者間にもばらつきが小さいことを示す。一方、ローリング角速度は、全試技で負の値 (トップスピン方向への回転) を記録したが、最大値と最小値とでは 30.1 rad/s の差が見られた (表 2-3)。この値は平均値 (-17.7 rad/s) の大きさの約 170 %であり、変動係数も 45 %であったことから、ローリング角速度は試技間の差異が大きい変数であることが示された。また、ローリング角速度の各被験者 5 試技分における被験者内の変動係数は、全被験者平均で 23 %となった。以上より、バットの速度を表すパラメータにおいて、ヘッド速度は試技間のばらつきが小さく、ローリング角速度は被験者間、ならびに被験者内の試技間におけるばらつきが大きな変数であることが明らかになった。また、インパクト直前のスイング角度は、水平面に対し 0.20 rad 上向きを示し、最大値 (0.33 rad) と最小値 (0.06 rad) との間に 0.27 rad の差が見られたが、全ての試技で正の角度を記録した (表 2-3)。これより、いずれの被験者もインパクトへ向かうバットの軌道は、下降方向ではなく上昇方向 (アッ

パースイング)であった。

表 2-2 投球と打球の運動学データ

		Mean \pm SD	CV	Max	Min	n
Pitched ball	$V_{\text{ball/pre}}$ (m/s)	26.7 \pm 1.4	5.1	29.0	22.5	27
	θ (rad)	0.13 \pm 0.03	20.0	0.17	0.07	27
	$\omega_{\text{ball/pre}}$ (rps)	-23.0 \pm 2.7	11.7	-29.4	-19.5	23
Batted ball	$V_{\text{ball/post}}$ (m/s)	36.6 \pm 3.5	9.6	42.0	26.0	27
	ϕ (rad)	0.50 \pm 0.14	27.8	0.79	0.27	27
	$\omega_{\text{ball/post}}$ (rps)	37.6 \pm 17.2	45.7	79.9	11.6	23
	D_f (m)	90.2 \pm 10.3	11.4	110.0	71.0	27
	$E_{\text{ball/post}}$ (J)	104.6 \pm 15.0	14.3	130.5	71.1	23

表 2-3 スイングとインパクトの運動学データ

		Mean \pm SD	CV	Max	Min	n
Swing	V_{head} (m/s)	33.8 \pm 2.6	7.7	38.5	26.0	27
	ω_{rolling} (rad/s)	-17.7 \pm 8.0	45.1	-30.4	-0.3	27
	ψ (rad)	0.20 \pm 0.07	34.3	0.33	0.06	27
Impact	r_{imp} (m)	0.67 \pm 0.04	5.4	0.72	0.57	27
	t_c (s)	0.0012 \pm 0.0002	14.9	0.0016	0.0010	23
	ξ (rad)	0.34 \pm 0.09	26.8	0.60	0.21	27

3.2 打球とインパクト

打球飛距離は 90.2 m の平均値に対して変動係数が 11 %程度であった (表 2-2)。なお、成功試技は 60 m 以上としたが、全ての試技が 70 m を上回った。また、打球の運動エネルギーは平均 104.6 J となり、全運動エネルギーのうち並進成分の割合が 97.3 ± 2.9 %であった。打球速度は、飛距離と同様にばらつきが小さい変数 (変動係数 9.6 %) であったが、打球角度 (変動係数 27.8 %) と打球の角速度 (変動係数 45.7 %) はばらつきの大きな変数であった。これらより、90 m 前後の飛距離を生み出すためには、打球の角度や角速

度の大小に関わらず、ある基準以上の打球速度が必要と考えられる。

本実験における成功試技は、各被験者が自己評価において満足のいく打撃と判断したもののみであり、打ち損じた試技を除いていた。それにもかかわらず、インパクト位置は最大値 (0.72 m) と最小値 (0.57 m) との間に 0.15 m のばらつきが見られた (表 3)。これより、バットの芯は 1 点のみに特定されるものではなく、ある大きさの範囲に広がっていると言える。Cross (1998) や Nathan (2000) の報告によると、硬式野球用の木製バットを用いて計測した 1,2 次の振動曲げモードの節はそれぞれ 0.67 m と 0.71 m, 0.68 m と 0.72 m に存在する。また、本実験で使用したバットにおいて、インパクト後に並進運動を伴わないピボット位置をグリップエンドから 0.15m の位置 (打者のグリップ位置) と仮定した際の撃心の位置は 0.695 m であり、先行研究での振動曲げモードの節の位置に近接していた。Nathan (2003) や Cross (1998) は振動曲げモードの節に近接する一定の範囲を、そのバットの『スイートスポットゾーン』としており、本実験で使用したバットについても 1,2 次の振動曲げモードの節は隣接する位置に存在すると考えられる。しかし、本実験で得られた 0.15 m のばらつきが先行研究より大きかったことは、打者自身が満足のいく打撃であったと判断したインパクト位置が、撃心の位置を含む振動曲げモードの節に近接する範囲より広いことを示している。また、衝撃線角度はスイング角度と比較して有意に大きく ($p < 0.01$)、かつ変動係数 (26 %) の大きな変数であった。これら結果は、打ち損じた試技を除いた場合においても衝撃線とインパクト直前のスイング角度が一致する直衝突ではなく、バットがボールの中心よりもわずかに下を打撃する斜衝突であったこと、ならびにインパクト位置はバットの短軸方向にばらつき (0.21~0.60 rad) をもつことを示している (表 2-3)。

3.3 打球飛距離と打球の運動エネルギーに影響を及ぼすインパクトおよび打球パラメータ

打球速度は打球飛距離と正の相関関係を示し ($r = 0.79, p < 0.01$), 打球の角速度は飛距離と負の相関関係を示した ($r = -0.43, p < 0.05$, 表 2-4). この結果は, 打球の速度が大きく, 角速度が小さかった試技ほど, 打球の飛距離が長かったことを意味する. 流体力学の原理に基づくと, 打球のバックスピン方向への角速度はマグナス効果による揚力を生むため, 打球速度が一定の場合, 通常の範囲内の打球であれば, バックスピンは飛距離に対しプラスの影響をもたらす (Watts and Baroni 1989). しかし, 本実験より得られた打球の角速度には, 打球速度との間に負の相関関係 ($r = -0.70, p < 0.01$, 表 2-4) が, また衝撃線角度とスイング角度の差 ($=[\text{衝撃線角度}] - [\text{スイング角度}]$) との間に正の相関関係 ($r = 0.93, p < 0.01$, 図 2-4) が示された. つまり, バットの軌道面に対しボールがより上方に衝突した試技では, 衝突位置におけるスイング速度の衝撃線に平行な成分が減少し, その結果ボールに作用した撃力 (衝撃線に平行な作用線を持つ力で, 反発係数と相対速度の衝撃線成分に比例する大きさを持つ力) が小さくなったため, 角速度が大きかった試技でも飛距離が伸びなかったと考えられる.

打球の運動エネルギーについては, 衝撃線角度 ($r = -0.41, p < 0.05$), 打球速度 ($r = 0.99, p < 0.01$), 打球角度 ($r = -0.42, p < 0.05$), 打球の角速度 ($r = -0.60, p < 0.01$) との間に有意な相関関係が認められた (表 2-4). この結果は, ボールに対するバットの入射角が小さい直衝突に近いインパクトにより, 大きな打球速度と小さな角速度を獲得した打球が低い角度で放たれた場合に, 打球は大きな運動エネルギーをもったことを示している. 大きな入射角による斜衝突は, バットのボールに対する相対速度の接線成分を増加させたため, より大きな摩擦力がボールに作用したと考えられる. その結果として, 打球の角速度が増

加し、大きな入射角に応じた大きな反射角で打球が飛翔したと考えられる。実際、計測された打球の運動エネルギーが、衝撃線角度および打球角度との間で負の相関関係を示したことから、打球の運動エネルギーを高めるためには、飛距離と同様により直衝突に近い打撃を行うことが重要と考えられる。

表 2-4 打球, スイング, インパクトにおける各変数の相関行列

		Batted ball parameters					Swing parameters			Impact parameters		
		D_f	$E_{\text{ball/post}}$	$V_{\text{ball/post}}$	ϕ	$\omega_{\text{ball/post}}$	V_{head}	ω_{rolling}	ψ	r_{imp}	t_c	ζ
D_f	(m)	-										
$E_{\text{ball/post}}$	(J)	0.82 **	-									
$V_{\text{ball/post}}$	(m/s)	0.79 **	0.99 **	-								
ϕ	(rad)	-0.22	-0.42 *	-0.61 **	-							
$\omega_{\text{ball/post}}$	(rps)	-0.44 *	-0.60 **	-0.70 **	0.76 **	-						
V_{head}	(m/s)	0.65 **	0.65 **	0.74 **	-0.23	-0.26	-					
ω_{rolling}	(rad/s)	-0.27	-0.49 *	-0.22	0.24	0.31	-0.13	-				
ψ	(rad)	0.33	0.42 *	0.20	0.19	-0.43 *	0.03	0.04	-			
r_{imp}	(m)	-0.14	0.13	-0.06	-0.06	-0.29	-0.29	-0.33	0.48 *	-		
t_c	(s)	-0.12	-0.12	-0.11	-0.09	0.04	0.15	-0.07	-0.37	-0.37	-	
ζ	(rad)	-0.28	-0.41 *	-0.59 **	0.93 **	0.81 **	-0.19	0.19	0.15	0.02	-0.07	-

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

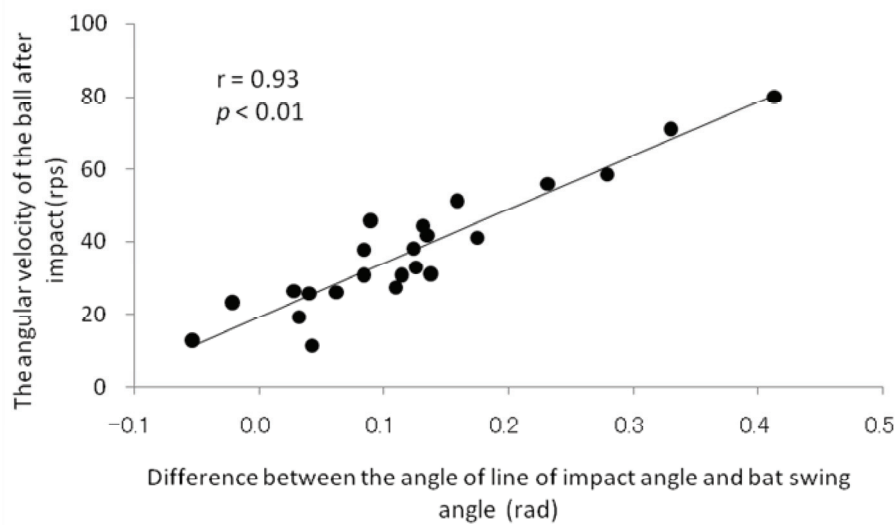


図 2-4 衝撃線とスイング角の差と打球速度との間の関係

3.4 打球飛距離および打球の運動エネルギーを大きくするためのスイング

打球の飛距離を従属変数として重回帰分析を行った結果、ヘッド速度、スイング角度の 2 変数を独立変数とする有意な回帰式が得られた (図 2-5)。その寄与率は 52 % であり、推定値の標準誤差は、7.40 m であった。また、この時の標準化偏回帰係数はそれぞれ、0.64 (ヘッド速度)、0.31 (スイング角度) であった。さらに、ステップワイズの重回帰分析によって得られた各モデルの寄与率 (R^2) を表 2-5 に示した。この回帰式を用いて、各試技において実測された飛距離を、スイング角度を 0 度としたスイング (レベルスイング) で生み出すために必要なヘッド速度を算出したところ、平均 3.8 m/s の速度増加が必要となることが推定された。この速度増加は本実験で得られたヘッド速度の平均値 (33.8 m/s) の 11.2 % に相当する。また、スイング角度を 0 度として推定した場合の飛距離の減少は 8.8 m となったことから、飛距離の増加にはスイング角度が非常に大きな役割を果たしていると考えられる。これらの結果は、打球飛距離の長い打球を打つためにはヘッド速度を高め、

アップースイングによりインパクトを迎えることが重要であることを示している。

打球の運動エネルギーを従属変数として重回帰分析を行った結果、ヘッド速度、ローリング角速度、スイング角度の3変数を独立変数とする有意な回帰式が得られた(図2-6)。その寄与率は63%であり、推定値の標準誤差は、9.87 Jであった。また、この時の標準化偏回帰係数はそれぞれ、0.47(ヘッド速度)、-0.39(ローリング角速度)、0.31(スイング角度)であった。さらに、ステップワイズの重回帰分析によって得られた各モデルの寄与率(R^2)を表2-5に示した。ローリング角速度についての負の回帰係数は、トップスピン方向の速度増加を示す。ローリング角速度が打球の運動エネルギーに及ぼす影響を推定するため、各試技において実測された打球の運動エネルギーを、ローリング角速度を0としたスイングで生み出すために必要なヘッド速度を、この回帰式を用いて算出したところ、平均3.6 m/sの速度増加が必要となることが推定された。これらの結果は、運動エネルギーの高い打球を打つためには、ヘッド速度とスイング角度を増加させるとともに大きなトップスピンのローリング角速度を持たせたバットでインパクトを迎えることが重要であることを示している。

表 2-5 ステップワイズの重回帰分析により得られたモデルの累積寄与率

Dependent variable	Independent variable	R^2
D_f (m)	V_{head} (m/s)	0.43
	V_{head} (m/s), ψ (rad)	0.52
$E_{ball/post}$ (J)	V_{head} (m/s)	0.43
	V_{head} (m/s), $\omega_{rolling}$ (rad/s)	0.54
	V_{head} (m/s), $\omega_{rolling}$ (rad/s), ψ (rad)	0.63

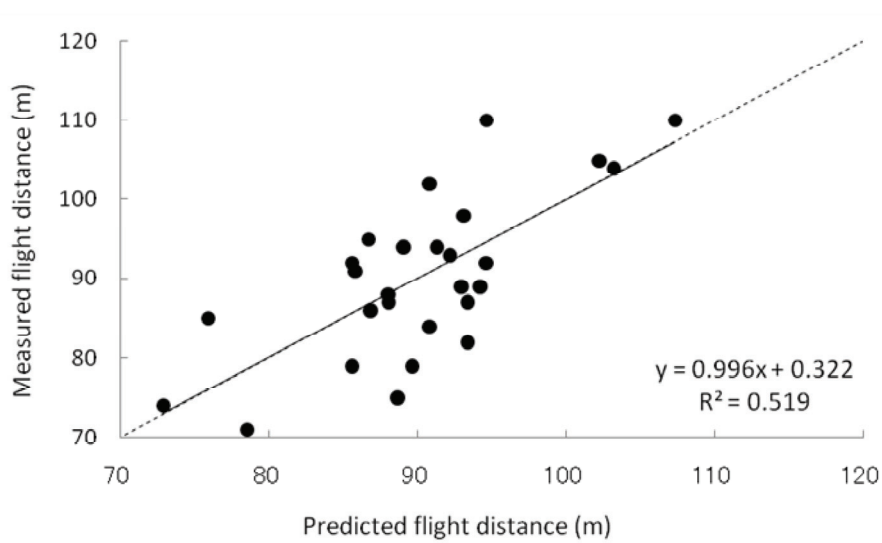


図 2-5 重回帰分析により得られた打球飛距離の予測値と測定値の関係。推定式：打球飛距離 (m) = $-7.48 + 2.60x_1 + 45.35x_2$ (x_1 = ヘッド速度, x_2 = スイング角), $F = 13.15$, $p = 0.000$.

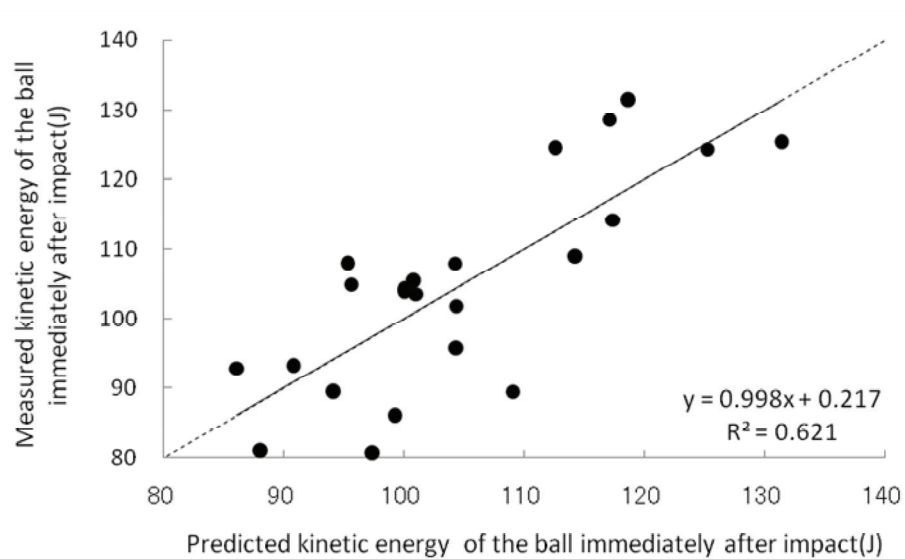


図 2-6 重回帰分析により得られた打球の運動エネルギーの予測値と測定の関係。推定式：打球の運動エネルギー (J) = $-35.18 + 3.34x_1 - 0.72x_2 + 64.58x_3$ (x_1 = ヘッド速度, x_2 = ローリング角速度, x_3 = スイング角), $F = 10.54$, $p = 0.000$.

本研究により、バットのローリング角速度はスイングの被験者間差を顕著に表す変数であることに加え、打球の運動エネルギーの獲得には貢献するが、打球の飛距離には貢献が小さいことが明らかとなった。冒頭で記したように、ローリング角速度を増加させるとインパクト時の摩擦によって打球にさらなるバックスピンの加わるため飛距離が伸びるのではないかという仮説を立てて本研究を開始した。しかし、①ローリング角速度と打球の飛距離との間に関連が見られなかった($r = -0.27, p > 0.1$, 表 2-4)こと、ならびに②ローリング角速度と打球の角速度との間に関連が見られなかった ($r = 0.31, p > 0.1$, 表 2-4)ことから、この仮説は棄却された。また、ローリング角速度の投入によって回帰式による打球飛距離の推定精度が有意に向上しなかった ($p > 0.1$) ことは、シミュレーションによる Sawicki et al. (2003) の報告を支持する結果となった。

バットのローリング角速度がどのようなメカニズムで打球に影響を及ぼすのかについて以下に考察する。まず、ローリング角速度のスイングパラメータとしての独立性を検証した。ローリング角速度はヘッド速度 ($r = -0.13, p > 0.5$) やスイング角度 ($r = 0.04, p > 0.8$) との間に相関関係が認められなかった (表 2-4) ことから、ローリング角速度と打球の運動エネルギーとの関係が、他のスイングパラメータを介した影響によって出現した擬似相関である可能性が低いことが確認できた。次に、ローリング角速度が打球の回転・並進運動に及ぼす影響について考察する。打球の角速度を従属変数とし、打球パラメータを除いた際の理論上、打球の角速度に影響を与える変数 (ヘッド速度・ローリング角速度・スイング角度・衝撃線角度) を独立変数として重回帰分析を行った結果、衝撃線角度、スイング角度、ヘッド速度の 3 変数を独立変数とする、寄与率 92% の回帰式が得られた。この結果は、ローリング角速度が打球の角速度の規定因子としてほとんど貢献しないことを意味する。次に、ボールの並進運動に及ぼすローリング角速度の影響について考察する

ため、インパクト直前のボール・バットの速度および入射角，ならびに衝撃線角度を一定とした場合のボールに加わる力について，3種の衝突モデル（図 2-7）を設定した．第一モデルは，ボール・バット間に作用する摩擦力が無視できる場合である（図 2-7 a）．この場合にボールに作用する力は，衝撃線と平行な撃力のみとなるため，ボールの重心速度は衝撃線の方向に変化することになる．第二モデルは，ボール・バット間に摩擦力が働く条件で，ローリング角速度が 0 の場合である（図 2-7 b）．ボールに作用する力は，撃力に加えて接触面の接線方向にはたらく摩擦力である．この摩擦力は，ボールに対してバットがその接触面に沿って滑る方向，または滑ろうとする方向に作用するため，本研究における打撃のように衝撃線角度が正の値をとる場合は，前方下向きの作用線を持つ．この摩擦力の影響により，ボールの重心はインパクト時に衝撃線角度よりも下方に傾いた方向に加速することになる．また，摩擦が無視できる場合（図 2-7 a）と比べて，ボールに作用する合力が撃力と摩擦力のベクトル和として増加するため，この場合の加速度の大きさも増大すると考えられる．これらの影響は，バットが高いローリング角速度を有する第三モデルの場合（図 2-7 c）に，より顕著になると考えられる．したがって，ボール・バット間に摩擦力が作用する現実の打撃において，インパクト時にボールに作用する合力は，バットが高いローリング角速度を有した場合の方が低い場合よりも大きく，且つより下方へ傾くと考えられる．これら三種の衝突モデルに基づいて検証した結果と本研究により観察された現象とを融合すると，ローリング角速度が打球に及ぼす影響が推察できる．すなわち，大きなローリング角速度をもつバットによる打撃は，ボールに作用する合力の増加に伴い打球速度と運動エネルギーを増加させるが，合力がより下方に傾くことに伴い打球角度を減少させると推察される．そして，これら 2つの要因の打球飛距離に及ぼす影響が相殺されたことにより，ローリング角速度が飛距離の説明変数として選択されなかったと考えられる．

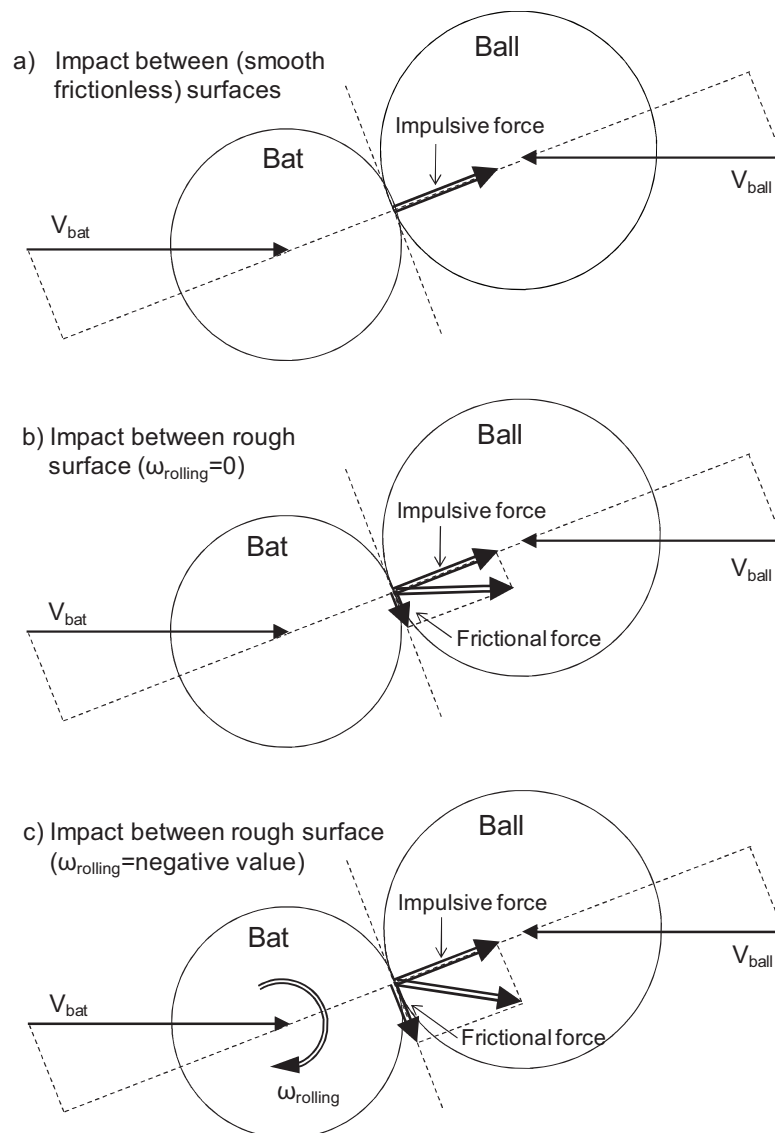


図 2-7 インパクトの瞬間にボールに作用する力を示した 3 種の衝突モデル. a) ボールとバットの接触面に摩擦が作用しない衝突. b) 接触面に摩擦力が作用する衝突. c) 斜め衝突に起因する摩擦力とバットのローリングに起因する摩擦力の両者が伴う衝突.

4. まとめ

本研究の結果、打球の速度が大きく、角速度が小さかった試技ほど打球の飛距離が長く、直衝突に近いインパクトにより大きな打球速度と小さな角速度を獲得した打球が低い角度で放たれた場合、打球が大きな運動エネルギーを有することが明らかとなった。また、競技レベルの高い大学生選手がフリーバッティングにおいて打球の飛距離を長くするためにはヘッドスピードを高め、大きなスイング角度でインパクトさせることが重要であり、打球の運動エネルギーを高めるためには、ヘッド速度とスイング角度を増加させるとともに大きなローリング角速度を持たせたバットでインパクトを迎えることが重要であることが示唆された。

第3章 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

1. 諸言

野球の試合において、打者はヒットやホームランの可能性を高めるために多くの場面で高速度・高回転で飛翔する『痛烈な打球』を放つことを心掛ける。このような特徴をもつ打球は、並進速度だけではなく角速度も大きいため揚力の影響を強く受け、その結果としてバックスピンの場合は飛距離が伸び (Nathan 2008, Watts and Bahill 2000)、トップスピンの場合はバウンドによる減速が少ない強いゴロになるといった特徴を有する。様々な球種、球速で投げられたボールを打ち返し高速度の打球を放つには、空間的かつ時間的に正確に打撃することおよびバット速度を大きくすることが重要であると報告されている (高木ら 2010, Crisco et al. 2002)。これら 2 要因は角速度の加わった運動エネルギーの大きな打球を放つためにも重要と考えられる。

バット速度の大きさはボールインパクト時に生じる撃力の大きさを規定する力学的要因のひとつであり、打球の速度および運動エネルギーが共に大きな打球を放つための最も重要な要因である (城所ら 2011, Sawicki et al. 2003)。打撃動作におけるバットの運動は並進運動と回転運動が同時に起こる一般運動にあたるため、バットを構成する質点の速度は部位によって大きく異なる。したがって、各打者の各打撃におけるバットスイングの特性を定量する指標としてバット速度を捉える場合、バット上のある一点の速度のみで表すのではなく、基準となる点の並進速度と角速度に分けて定量する必要がある。しかしながら先行研究では、インパクト直前におけるグリップエンドの打撃方向への速度がほぼ 0 であり (平野 1984, 及川 1996)、インパクト位置の影響を受けずに試技間差を評価できることから、ヘッド速度の大きさがバット速度の大小を示す指標として用いられることが多い (McIntyre and Pfautsch 1982, Tabuchi et al. 2007)。城所ら (2011) は、ヘッド速度の

大きさに加えてバットの長軸回りの回転（ローリング角速度）およびヘッド速度の方向を表すスイング角度が打球の運動エネルギーの獲得に貢献することを明らかにしている。また Sawicki et al. (2003) も打球の飛距離を伸ばすための重要な指標としてスイング角度をあげている。これらの研究結果は、高速度・高回転で飛翔するような打球を放つための要因として、ヘッド速度の大きさだけでなくバットの角速度やスイング角度を加えたスイング特性に着目する必要性を示すものである。

打撃の空間的な正確さは投球されたボールの到達位置を予測する能力および打者が意図したインパクト位置へバットをスイングする能力に起因し、打撃の時間的な正確さは投球されたボールが打撃ポイントに到達するまでの時間を予測する能力およびスイングを開始するタイミングとインパクトまでのスイング時間を調節する能力に起因する。正確に予測したボール到達位置に正確にバットをスイングさせ得たとしても、時間的正確さを欠くと意図した位置でのボールインパクトが困難になり力強い打撃は望めなくなる。これら正確さを左右する因子のひとつひとつを個別に分析することは困難であるが、その影響を総合した結果はボールインパクトにおけるボール・バットの衝突位置として定量することができる。理想的な衝突位置はバットの長軸上に定義される『芯』あるいは『スイートスポット』と呼ばれる点であり、振動曲げモードの節に相当する位置やバットの慣性パラメータおよびバットの回転中心位置により決定される撃心 (center of percussion) の位置 (Brody 1986, Van Zandt 1992, Cross 1998, Cross 2004, Vedula and Sherwood 2004) がこれにあたる。この位置でのボールインパクトは、インパクト時のエネルギー伝達過程で生じる損失を最小限に抑えるため (Cross 2001)、反発係数が最も高い衝突となる。理想的な衝突位置はバットの短軸方向についても規定される。短軸方向への衝突位置は、ゴロやフライなど打球の発射角度を規定するだけでなく、摩擦の発生により打球の回転運動に影響

響を及ぼす要因となるからである。このように、バットの長・短軸成分として定量化できるボール・バットの衝突位置は、理想的な衝突位置を基準に表すことで打撃の空間的・時間的な正確さを示す指標（インパクトパラメータ）になり得ると考えられる。

バットのスイング特性やボール・バットの衝突位置を分析した研究の多く（Watts and Baroni 1989, Watts and Bahill 2000, Sawicki et al. 2003）は、個々の変数と打球速度との関連を数値シミュレーションによって分析したものである。このため、偶然性や各打者の技術に起因するような衝突位置のバラツキやその被験者間差は考慮されていない。また、各打者のスイング特性を表す指標と衝突位置の間に存在し得る相互作用も十分に考慮されておらず、実際のバッティングにおけるパフォーマンスの特徴を十分に反映する結果が得られたとは考え難い。Schmidt and Lee (2005) は、一般に動作の速さと正確さとの間にはトレードオフの関係が存在すると報告しており、野球のバッティングにおいてもスイングの速度とインパクトパラメータとの間にはトレードオフの関係が存在すると考えられる。実際の打撃分析に基づいた研究にはスイングの速度とインパクトの正確さとの間にはトレードオフの関係がみられなかったとする報告はあるが（高木ら 2008）、バットの長・短軸の両成分についてインパクトパラメータを分析したものは見当たらない。そこで、本研究は一定の速度で投げられたボールを繰り返し打撃させた際に、バットのスイング特性を表す各指標とインパクトパラメータの各成分が打球の運動エネルギーにどのように貢献するかを被験者内で検討すること、ならびにスイングの速度を表す指標とインパクトパラメータの各成分との間にトレードオフの関係が存在するかどうか明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、東京六大学野球リーグに所属する選手 10 名（身長 1.737 ± 0.064 m, 体重 73.7 ± 7.6 kg, 年齢 21.0 ± 0.8 歳, 野球歴 14.3 ± 1.7 年）で、このうち右打者 7 名, 左打者 3 名であった。また、全被験者のうち 5 名 (D, F, G, H, I) は実験実施日より過去 1 年間の公式戦に出場していた。本実験の実施にあたり、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会の承認を得た。また、被験者には事前に本研究の目的や実験方法などを説明し、実験参加への書面による同意を得た。

2.2 実験試技

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、バッティングケージ内にて打撃を行わせた。ホームベースより規定の距離 (18.44 m) 離れた地点から、ドラム式マシンを用いて、硬式野球ボール (半径 : 0.036 m, 質量 : 0.148 kg) を平均速度 33.2 m/s で投じた。この時、被験者の全試技において投球の発射位置、発射角度、および初速度が一定になるよう設定した。これを、各被験者に 50 球全力でセンター方向に向けて正確に打ち返すよう指示を与えた。この時、各被験者にはフォームのバランスを崩さずにセンター方向へ打ち返すことができるコースへの投球のみ打撃させた。打球がセンターラインを中心に左右各 15 度の範囲内、かつフェアグラウンドに放たれた全ての試技を成功試技とした (図 3-1)。

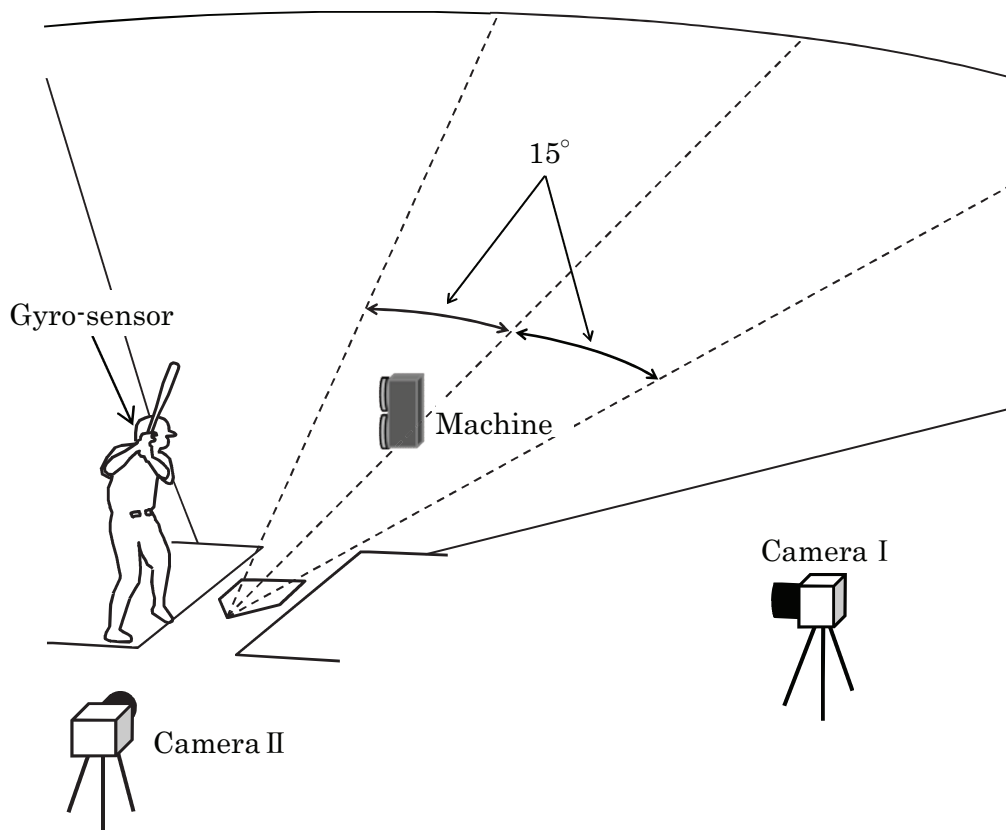


図 3-1 実験環境.

2.3 データ収集

打撃動作中のバットとボールは、2台の高速度カメラ (Camera I, Camera II) を用いて撮影した。Camera I (Vision Research 社製, Phantom Miro, 撮影速度 7000 fps, 露光時間 0.14 ms) は、打者が正対する方位である側方 9.0 m 地点 (右打者の場合, ホームベースから左バッターボックスへ向かう方向) に, Camera II (CASIO 社製, EX-F1, 撮影速度 300 fps, 露光時間 1 ms) を打者の後方に設置した。また, 実験で使用した硬式用木製バット (ミズノ社製, 2TW-10455YT, 0.84 m, 0.915 kg, グリップエンドから重心位置までの距離 : 0.570 m) のグリップエンドに 3 軸角速度センサ (DTS 社製, ARS-K12, サンプルング周波数 1000 Hz) を装着した。センサより得られたアナログデータは, 被験者の腰に

装着した無線式データロガーシステム (S&ME 社製, FA-DL3000) を用いて A/D 変換し、コンピュータに取り込んだ。

2.4 データ処理

2次元分析に必要なデジタイズ点を正確に判断できる映像を各被験者につき 18~40 球、計 306 試技を分析対象とした。なお、全ての変数の記号および定義を表 3-1 に示した。ボールとバットの挙動は Camera I によって撮影された映像から画像解析ソフトウェア (Siliconcoach 社製, Siliconcoach Pro7) を用いて、本塁中心からセンターに向かう鉛直面に分析対象となる点を投影したときの鉛直上下動ならびに水平動として分析した。ボールのデジタイズ位置はボールの体積中心とし、バットのデジタイズ位置はバットヘッドの中心点とした。また、この時のデジタイズ位置の 2次元座標を 2次元実長換算により取得した。本実験より得られる全ての角度は水平線を基準に算出し、反時計回り (x 軸) の回転を正の値とした (図 3-2)。

インパクト直前の投球速度 ($V_{\text{ball/pre}}$), 投球角度 (投球の速度ベクトルと水平線とのなす角度: θ_{pitched}) は、インパクト直前 15 フレーム (0.0021 秒間) におけるボールの体積中心の変位から算出した。また、バットのヘッド速度 (V_{head}), スイング角度 (バットヘッドの速度ベクトルと水平線とのなす角度: θ_{swing}) は、インパクト直前 15 フレーム (0.0021 秒間) におけるバットヘッドの中心点の変位から算出した。同様に、インパクト直後の打球速度 ($V_{\text{ball/post}}$), 打球角度 (θ_{batted}) はインパクト終了後 15 フレームにおけるボールの変位から算出した。インパクト前後のボールおよびバットの角度は速度ベクトルと水平線とのなす角度とした。また、バットのグリップエンドに装着したセンサが計測したインパクト直前におけるバットの長軸回りの角速度をローリング角速度 (ω_{rolling}) と定義した

(図 3-3). ローリング角速度はスイングに対してバックスピン方向への回転を正とした.

投球角速度 ($\omega_{\text{ball/pre}}$), および打球角速度 ($\omega_{\text{ball/post}}$) は, 3 軸角度測定装置 (図 3-4) を用いて計測した. まず, 装置を上方から観察するための固定カメラを設置した. 続いて, Camera I より撮影した画像からボールの回転軸を見つけ出し, 画像上のボールの縫い目と固定カメラに映し出されたボールの縫い目が合致するように装置上のボールを調整した. このとき, 装置にボールを固定するためのアームがボールの回転軸と一致するよう留意した. 次に, 撮影画像を 30 フレーム (0.0043 秒) 進め, この画像におけるボールの縫い目の見え方と合致するよう装置上のボールを手動で回転させた. 経過時間 (0.0043 秒) と回転角度の値からボールの角速度を算出した. この作業を繰り返すことによって, 30 フレームごとの角速度を記録し, インパクト前後それぞれについて 90 フレーム (0.013 秒) の角速度の平均値を, その投球および打球の角速度 ($\omega_{\text{ball/pre}}$, $\omega_{\text{ball/post}}$) とした.

また, インパクト直後におけるボールの並進・回転を合わせた運動エネルギー ($E_{\text{ball/post}}$) を次式より算出した.

$$E_{\text{ball/post}} = \frac{1}{2} m_{\text{ball}} V_{\text{ball/post}}^2 + \frac{1}{2} I_{\text{ball}} \omega_{\text{ball/post}}^2 \quad (1)$$

ここで, m_{ball} はボールの質量 (0.148 kg), I_{ball} はボールの慣性モーメント ($7.7 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$) とした (付録 1). なお, バットから離れた直後のボールは完全な球状ではなかったが, 硬式野球ボールの復元に要する時間は非常に短く, 本研究で得られた画像からボールがバットから離れた 0.001 秒後には完全な球状に戻っていたため, 本研究における運動エネルギーを算出する際のボールの慣性モーメントの値は一定とした.

ボールがバットにインパクトした位置を Camera II より撮影したビデオ画像から計測し, バットの長軸上におけるインパクト位置からバットの芯までの距離 (r_{ss}) を算出した. Cross (1998) は 1, 2 次における振動モードの節に近接する一定の範囲を, そのバットの

『スイートスポットゾーン』としている。これより、本研究におけるバットの芯の位置は、振動モード解析を用いて計測した1, 2次における振動モードの節の位置（1次：0.674 m, 2次：0.713 m）の中間点（グリップエンドから0.693 m）とした。なお、本研究で使ったバットにおいて、インパクト時に並進運動が生じないピボット位置を、バットのグリップエンドからバットヘッドに向かって0.150 mの位置に設定した際の撃心の位置はグリップエンドから0.688 mの距離にあり、本研究で定義した芯の位置（0.693 m）と近似していた。また、インパクト時におけるボールとバットの断面中心を結んだ線分を衝撃線と定義し、その向きは水平線を基準にした角度（衝撃線角度： θ_{impact} ）として表した（図3-2）。この衝撃線角度は、ボールがバットの上部・中央・下部のどこに衝突したかを示す指標であり、斜衝撃において定義される『入射角： $\theta_{\text{incidence}}$ （衝突直前の相対速度ベクトル（ $V_{\text{ball/bat}}$ ）と衝撃線のなす角度）』とは本質的に異なるものである。従って、衝撃線角度が0 radとなる打撃が必ずしも直衝撃を意味するものではない。

表 3-1 各変数の記号と定義.

Pitched ball	$V_{\text{ball/pre}}$: The velocity of the pitched ball immediately before impact
	θ_{pitched}	: The angle of the pitched ball from horizontal immediately before impact
	$\omega_{\text{ball/pre}}$: The angular velocity of the ball before impact
Swing	V_{head}	: The velocity of the bat head immediately before impact
	θ_{swing}	: The angle from horizontal of the bat swing immediately before impact
	ω_{rolling}	: The angular velocity of the bat around the long axis (Rolling angular velocity)
Impact	r_{ss}	: Length from sweet spot of the bat to impact point
	θ_{impact}	: The angle from horizontal of the line of impact
Relative motion	$V_{\text{ball/bat}}$: The velocity of the pitched ball relative to the bat head (Relative velocity)
	$\theta_{\text{incidence}}$: The angle from the line of impact of the relative velocity (Angle of incidence)
Batted ball	$V_{\text{ball/post}}$: The velocity of the batted ball immediately after impact
	θ_{batted}	: The angle of the batted ball from horizontal immediately after impact
	$\omega_{\text{ball/post}}$: The angular velocity of the ball after impact
	$E_{\text{ball/post}}$: The kinetic energy of the ball immediately after impact
Material property	m_{ball}	: Ball mass
	I_{ball}	: Moment of inertia of ball

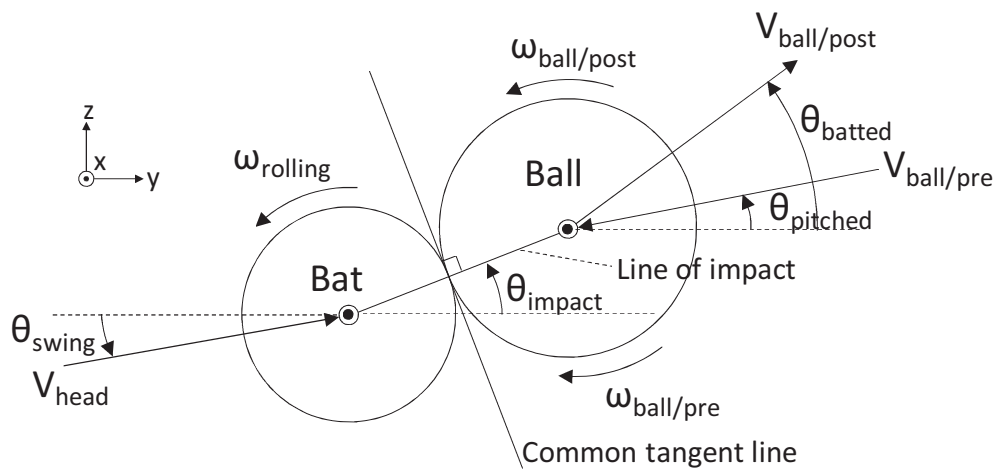


図 3-2 変数を定義するためのボール・インパクトの図. 角度と角速度は反時計まわりを正とした.

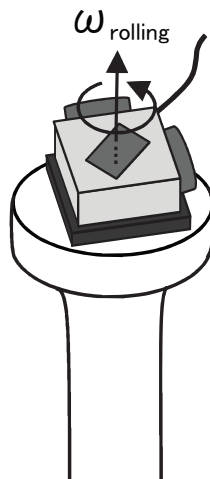


図 3-3 バットのグリップエンドに装着した角速度センサ



図 3-4 ボールの回転数を計測するためのジャイロスコープ

2.5 統計処理

被験者間差の分析では、打球の運動エネルギー、芯からの距離、衝撃線角度、ヘッド速度、ローリング角速度、スイング角度について各被験者における全試技の平均値をその被験者の代表値とし、打球の運動エネルギーと芯からの距離、衝撃線角度、ヘッド速度との関係を Pearson の積率相関係数を用いて分析した。また、被験者間のばらつきは標準偏差で示し、各被験者の平均値が全被験者の平均値からどの程度異なるかを Z-score により検定した。

各被験者における打球の運動エネルギーの変動を説明する因子となるスイング特性（ヘッド速度、ローリング角速度、スイング角度）、およびインパクトパラメータ（芯からの距離、衝撃線角度）を抽出するため、当該被験者の放った全ての試技を対象に運動エネルギーを従属変数、スイング特性、およびインパクトパラメータを独立変数として重回帰分析を行った。重回帰式に含める独立変数の選択はステップワイズの変数増減法を用いて決定した。各ステップにおいて、回帰モデルに新たに投入する基準を $p \leq 0.05$ 、回帰モデル

から除去する基準を $p \geq 0.1$ とした。各被験者について得られた重回帰式より、独立変数の標準化偏回帰係数と、独立変数と従属変数との相関係数の積を、各独立変数の従属変数への貢献度 (%) として算出した。本研究で行った実験は、ゴロやフライを含めたフェアグラウンドへ放たれた全ての打球をデータとして収集しているため、衝撃線角度は打球の運動エネルギーに対して直線的な関係とならない。これより、統計処理を行うための衝撃線角度は絶対値を使用した。インパクトパラメータとスイング特性の変動にトレードオフの関係があるかどうかを各被験者について分析するため、ヘッド速度に対する芯からの距離、衝撃線角度との関係を Pearson の積率相関係数を用いて検定を行った。全ての分析について、有意水準を 5%未満とした。

3. 結果と考察

3.1 投球のコンディション

投球速度は 33.2 m/s の平均値に対して変動係数が 4.1 %であったことから (表 3-2), ほぼ一定の速度で投げられたと考えられる. インパクト直前の投球角度は下向きに 0.02 ~ 0.14 rad の範囲であり, 水平線を大きく外れた試技は存在しなかった. また, 投球角速度は 37.0 rad/s の平均値に対して変動係数が 8.9 %であった. これらは, 投球がほぼ一定の速度で下向き 0.02 ~ 0.14 rad の軌道を通じたことを示しており, 本研究で観察された試技間および被験者間の打球の変動は, 投球条件の差異よりもスイングおよびインパクトパラメータの変動に起因するものと考えられる.

表 3-2 投球の運動学データ

	Mean ± SD	CV	Max	Min
$V_{\text{ball/pre}}$ (m/s)	33.2 ± 1.4	4.1	36.2	29.1
θ_{pitched} (rad)	0.08 ± 0.02	22.5	0.14	0.02
$\omega_{\text{ball/pre}}$ (rps)	-37.0 ± 3.3	8.9	-43.8	-26.9

3.2 スイング特性とインパクトパラメータ

インパクト直前のヘッド速度は 34.0 ± 2.0 m/s であり, 最大値 (41.2 m/s) と最小値 (27.7 m/s) との間に 13.5 m/s の差がみられた (表 3-3). また, インパクト直前のスイング角度は水平面に対して 0.08 ± 0.09 rad 上向きを示し, その最大値は 0.30 rad 上向き (アップスイング), 最小値は 0.16 rad 下向き (ダウンスイング) であった (表 3-3). 森下ら (2012) は, 世界大学野球大会公式戦における大学野球選手のスイング角度が $-0.24 \sim 0.26$ rad の範囲であったことを報告しており, 本研究結果と概ね一致していた. すなわちこの結果は, 本研究結果として得られた知見が大学野球レベルにおける現実的な打撃を十分に反映するものと考えられる. ローリング角速度は平均してトップスピン方向へ 15.0 rad/s

の回転速度を記録したが、最大値は 13.9 rad/s バックスピン方向へ回転していた。インパクト時の衝撃線角度は 0.17 ± 0.20 rad であり、 $-0.50 \sim 0.87$ rad の範囲に大きく分散していた。ここで、ボールとバットの衝突をバットに対するボールの相対運動として捉え、衝突前の相対速度ベクトルと衝撃線とのなす角度（入射角）を算出した。その結果、バットに対するボールの相対速度は 67.2 ± 3.0 m/s (58.9 ~ 76.1 m/s)、入射角は -0.09 ± 0.19 rad ($-0.77 \sim 0.55$ rad) であり、衝撃線角度とボールの入射角の間には有意な負の相関関係が示された ($r = -0.98, p < 0.01$, 図 3-5)。また、入射角 0 rad のときの衝撃線角度を近似直線の回帰式から算出したところ 0.08 rad であった。すなわち、これらの結果は衝撃線角度が入射角を決定する重要な要因であることを示すものである。

表 3-3 スイングとインパクト、ならびに相対運動の運動学データ

		Mean \pm SD	CV	Max	Min
Swing	V_{head} (m/s)	34.0 \pm 2.0	59.2	41.2	27.7
	θ_{swing} (rad)	0.08 \pm 0.09	107.8	0.30	-0.16
	ω_{rolling} (rad/s)	-15.0 \pm 8.5	56.6	13.9	-36.4
Impact	r_{ss} (m)	0.035 \pm 0.027	77.5	0.16	0.00
	θ_{impact} (rad)	0.17 \pm 0.20	114.5	0.87	-0.50
Relative motion	$V_{\text{ball/bat}}$ (m/s)	67.2 \pm 3.0	4.5	76.1	58.9
	$\theta_{\text{incidence}}$ (rad)	-0.09 \pm 0.19	216.3	0.55	-0.77

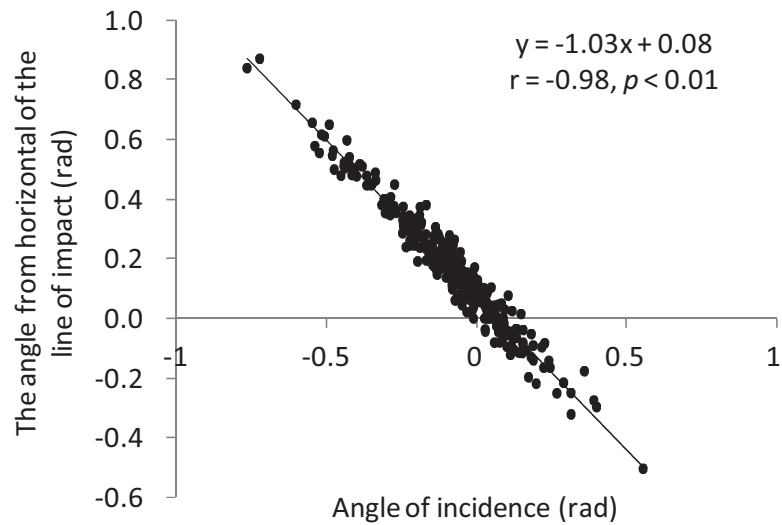


図 3-5 インパクト直前のバットに対するボールの相対速度ベクトルと衝撃線とのなす角度（入射角）と衝撃線角度との間の関係。

3.3 全試技における打球の運動エネルギー分布

全被験者全試技（計 306 試技）における打球の運動エネルギーは、106.2 J の平均値に対して変動係数が 21 %であった。このうち打球の運動エネルギーの大きかった上位 100 試技（全て 120 J 以上）に着目すると、2 試技を除いた 98 試技において、打球角度は ± 0.5 rad の範囲内にあり（図 3-6）、これらの試技における打球角速度の平均値（ 24.7 ± 15.7 rps）は、全 306 試技の平均値（ 36.7 ± 22.5 rps）の 67 %であった。また、これらの試技における打球の並進速度の平均値（ 41.7 ± 1.2 m/s）は、全 306 試技の平均値（ 37.1 ± 4.4 m/s）の 112 %であった。これに対し、打球角度が 1.0 rad 以上、または-1.0 rad 以下の試技（計 17 試技）における打球角速度の平均値（ 67.9 ± 13.2 rps）は、全 306 試技の平均値（ 36.7 ± 22.5 rps）の 185 %であった。このことから、フェアグラウンドへ放たれた全ての試技を分析対象とした場合、運動エネルギーの大きな試技は角速度が小さく、かつ並進速度が大

きなライナー，あるいは強いゴロであったことが観察された。

衝撃線角度と打球の運動エネルギーとの関連について検討するため，ヘッド速度と長軸上のインパクト位置がほぼ一定と仮定できる 148 試技を（平均値 ± 1 標準偏差以内の値，ヘッド速度：32.0 ~ 36.0 m/s，長軸上のインパクト位置：0.650 ~ 0.740 m）分析したところ，衝撃線角度の絶対値と打球の運動エネルギーとの間に負の相関関係が認められた（ $r = -0.77, p < 0.01$ ，図 7）。さらに，打球の運動エネルギーの並進成分のみを抽出すると，衝撃線角度と並進運動エネルギーの 2 変量から得られる回帰式の傾き（-93.5）は，衝撃線角度と全運動エネルギーから得られる回帰式の傾き（-79.9）より小さな値であった（図 7）。この結果は，衝撃線角度が大きな試技ほど打球の全運動エネルギーは小さな値となる一方で，その回転成分は大きな値となることを示している。この観察結果について，ボール・バット間での衝突に伴う運動エネルギーの並進成分と回転成分の関係性を仕事とエネルギーの原理から考察する。野球の打撃局面においてボールの接触面に分散して作用する力系は『接触面上の圧力中心に作用する同値の力 F^* 』に置き換えられる。バットがボールに対してなした仕事は力 F とその作用点の変位との内積に等しくなり，その値から熱・音等に消失されるエネルギーを除いた分だけボールの運動エネルギーが変化することになる。したがって，大きな撃力（衝撃線に平行な作用線を持つ力）が発生するような正面衝突（入射角 = 0 rad）において打球の運動エネルギーは最大化し，発生する撃力が小さくなるような斜め衝突では，衝撃線角度が大きい試技ほど打球の運動エネルギーが低下する結果（図 3-7）が得られたものと考えられる。また，バットがボールに加えた合力の作用線の傾きが衝撃線角度に応じて変化し，必ずしもボールの重心に向かって作用するわけではないため，その傾

*同値の力 F ：厳密にこの力系を圧力中心に作用する 1 つの力（ F ）に置換するには，衝撃線まわりの偶力（フリーモーメント）も同時に作用する力-偶力系を定義する必要がある。しかし，本研究における投球はバックスピンであり，そのような力が作用する可能性は極めて低いため，本研究では偶力を無視できるものとする。

きに応じて運動エネルギーが並進成分と回転成分とに分離して発生した (図 3-7) と考えられる。以上より、打球の運動エネルギーの並進および回転成分は独立して個々に生じさせ得るものではないこと、および打球の運動エネルギーの2成分の大きさは、衝撃線角度の大きさに応じて概ね規則的に変化することが示された。

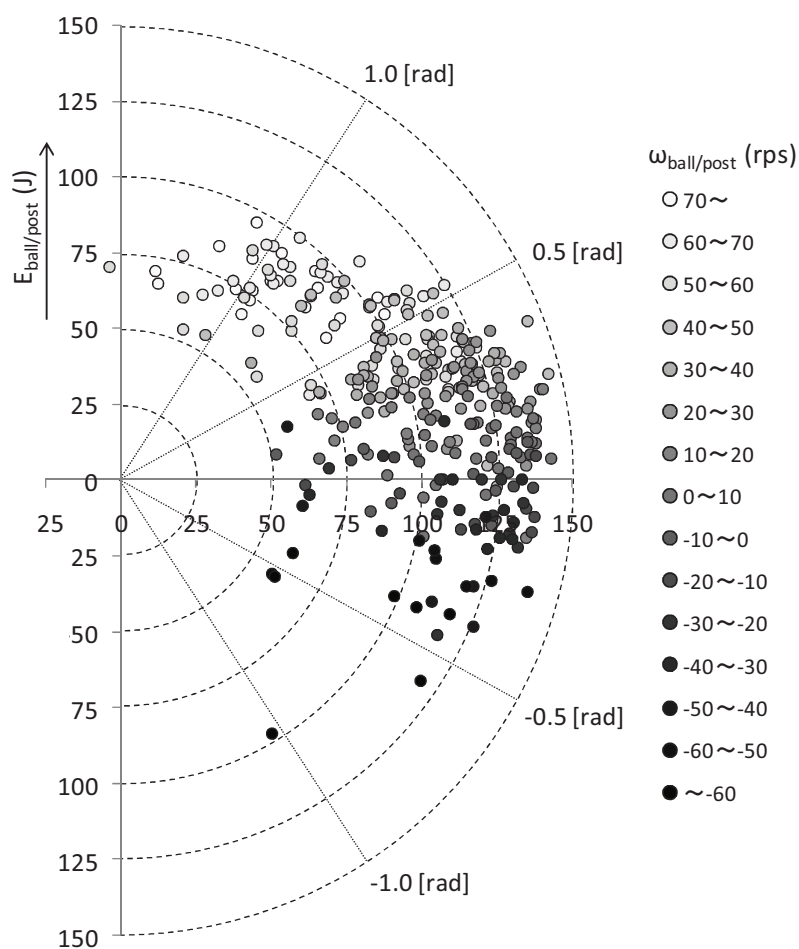


図 3-6 打球の運動エネルギーの分布図。打球の上下角と運動エネルギーの関係を極座標系上に示したものであり、半円の中心から遠ざかったプロットほど打球の運動エネルギーが大きかったことを示している。また、プロットの色は打球の回転速度を示しており、白色ほど大きなバックスピン回転であったことを示す。

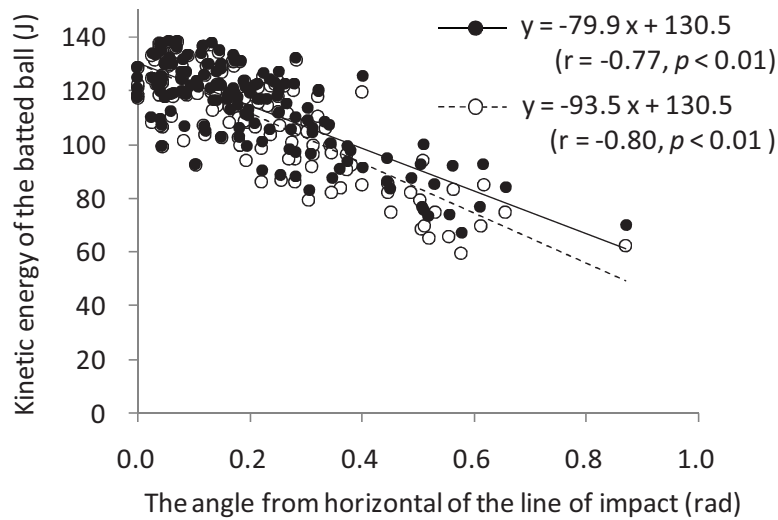


図 3-7 2 種の衝撃線角度と打球の運動エネルギーの関係。黒色のプロットは並進と回転を足し合わせた運動エネルギーであり，白色のプロットは並進のみの運動エネルギーである。

3.4 打球の運動エネルギーの変動を説明する打撃技術の被験者間差

各被験者について算出した代表値を用いて相関分析を行った結果，打球の運動エネルギーは芯からの距離 ($r = -0.81, p < 0.01$)，衝撃線角度 ($r = -0.71, p < 0.05$)，ヘッド速度 ($r = 0.87, p < 0.01$) との間に有意な相関関係が認められた (表 3-4)。すなわち，打球の運動エネルギーが平均的に大きな被験者ほど芯からの距離，および衝撃線角度が小さく，ヘッド速度が大きいことが明らかとなった。一方で，芯からの距離，衝撃線角度，ヘッド速度の 3 変数間に有意な相関関係は認められなかった ($p > 0.05$, 表 3-4)。この結果は，これら変数が独立して打球の運動エネルギーの被験者間差を決定する因子になっていることを示す。

表 3-4 打球の運動エネルギーとインパクト特性, ヘッド速度の相関行列

	$E_{\text{ball/post}}$	r_{ss}	θ_{impact}	V_{head}
$E_{\text{ball/post}}$	-			
r_{ss}	-0.81 **	-		
θ_{impact}	-0.71 *	0.45	-	
V_{head}	0.87 **	-0.59	-0.61	-

3.5 全試技におけるインパクト位置と打球の運動エネルギー分布

全被験者全試技 (計 306 試技) におけるボールのインパクト位置は, グリップエンドを基準にして長軸方向に 0.533 ~ 0.837 m の範囲 (平均 : 0.695 ± 0.045 m) に, 短軸方向に -0.0152 ~ 0.0238 m の範囲 (平均 : 0.0051 ± 0.0058 m) に分布していた (図 3-8). その内 120 J 以上の打球の運動エネルギーを記録した上位 100 試技におけるインパクト位置は, 長軸方向に 0.694 m の位置を中心として 0.633 ~ 0.748 m の範囲 (95 %信頼区間 : ± 0.044 m) に, 短軸方向に 0.0025 m を中心として -0.0075 ~ 0.0119 m の範囲 (95 %信頼区間 : ± 0.00691 m) に分布していた. 本研究で使用したバットの芯の位置 (振動モード解析を用いて計測した 1, 2 次振動モードの節の位置の中間点) がグリップエンドから 0.693 m であったことから, 95 %の確率で運動エネルギーの大きな打球を放つためには, バットの芯を中心として長軸方向に約 88 mm の幅で, 短軸上方向に約 14 mm の高さで定義される狭い範囲内でボールをインパクトする必要があることが明らかとなった.

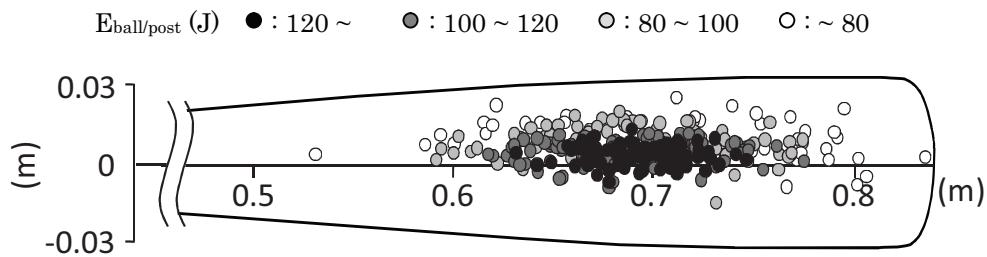


図 3-8 バットに対するボールのインパクト位置と打球の運動エネルギー。プロットの色が黒色なほど打球の運動エネルギーが大きかったことを示す。

3.6 打球の運動エネルギーの変動を説明するインパクトパラメータとスイング特性の被験者内変動

ステップワイズの重回帰分析を行った結果、全ての被験者で有意な回帰式が得られた(図 3-9)。その貢献度は 48 ~ 88 % であり、推定値の標準誤差は 7.3 ~ 12.3 J であった。選択された独立変数の係数をみると、全被験者について一様にヘッド速度とローリング角速度の係数は正の値に、芯からの距離と衝撃線角度の係数は負の値になった。芯からの距離は、打球の運動エネルギーの変動を説明する因子として全ての被験者の回帰式に選択された。また、その貢献度は 18 ~ 64 % であった。このうち 6 名の被験者については、選択された独立変数のうちで芯からの距離が最も貢献度の高い変数となった。すなわち、この 6 名の被験者は打球の運動エネルギーが芯からの距離の大小によって最も大きく変動し、その他の選手についても芯からの距離によって打球の運動エネルギーが有意に変動することが示された。また、衝撃線角度は被験者 C を除いた全ての被験者において、有意に打球の運動エネルギーの変動を説明する変数(貢献度 16 ~ 39 %)となった。さらに、芯からの距離と衝撃線角度は、合計で 48 ~ 76 % の割合で打球の運動エネルギーの変動を説明する変数となった。これらより、被験者によって貢献度に違いはみられたが、総じてインパクト

パラメータが打球の運動エネルギーの変動を説明する最も重要な因子となることが明らかになった。すなわち、運動エネルギーの大きな打球を放つためには、正確にインパクトさせることが最も重要であると考えられる。

打球の運動エネルギーの変動を説明するスイング特性として、6名の被験者についてはヘッド速度（貢献度13～23%）が、3名の被験者についてはローリング角速度（貢献度8～15%）が選択された。一方で、スイング角度はいずれの被験者の回帰式にも選択されなかった。これらの結果は、各被験者が繰り返し打撃した際の試技間差に着目した場合にはスイング特性が打球の運動エネルギーに及ぼす影響が小さいことを示しており、一見すると城所ら（2011）の研究結果とは相反するよう見受けられるものであった。城所ら（2011）の研究は、大学野球選手を対象にフリーバッティングをさせた際に記録した各打者の代表値（各被験者にとって最も飛距離が長く最も自己評価の高かった試技）をもとに、打球の飛距離と運動エネルギーの被験者間差に影響を与える要因を分析したもので、打球の飛距離や運動エネルギーを高めるためには大きなヘッド速度でインパクトさせることおよびスイング角度を増加させ所謂“アッパースイング”にすることが重要であると報告している。飛距離が長く自己評価の高い試技はボールをバットの芯付近で打撃したものが多いと考えられることから、記録された飛距離や運動エネルギーにはインパクト特性の被験者間差による影響が及ばず、結果的にスイング特性の被験者間差による影響のみが顕著に表れたものと考えられる。つまり、インパクトパラメータに試技間差が表れにくいような実験・分析手法を用いた先行研究ではスイング特性が打球に及ぼす影響が大きくなり、インパクトパラメータに打撃技術や偶然性の影響が表れるような実験・分析手法を用いた本研究ではスイング特性の影響が小さくなった結果、両研究の間には一見すると相反するような実験結果が得られたと考えられる。

本研究における打球の運動エネルギーはライナー性の打球で大きく、ゴロやフライといった打球角度の絶対値の大きな打球で小さかった (図 3-6). 打球角度を決定する要因には、インパクト時におけるバットスイングの方向 (スイング角度) とボールとバットの位置関係 (衝撃線角度) があり、ライナー性の打球を放つにはレベルスイングに近い角度でインパクトさせるようなスイングを行うことや、ボールの中心部を打撃することが有効であると考えられる. 実際、全 306 試技についてスイング角度とヘッド速度との関連を調べたところ、スイング角度が 0 度に近いレベルスイングによるインパクトにおいて最もヘッド速度が大きかった ($R^2 = 0.16$, $p < 0.01$, 図 3-10). 加えて、打球角度と衝撃線角度およびスイング角度との関連を調べたところ、それぞれについて有意な相関関係 ($p < 0.01$) が認められた. しかしながら、その関連の強さは衝撃線角度 ($R^2 = 0.96$) の方がスイング角度 ($R^2 = 0.12$) より遙かに大きかったことから、打球角度を決定する要因として衝撃線角度が重要であると考えられる. つまり、ライナー性の打球を放つためのボールインパクトは、飛来するボールに対して正面衝突に近い位置でバットをインパクトさせるものであるため、その結果として大きな撃力 (衝撃線に平行な作用線を持つ力で、反発係数と相対速度の衝撃線成分に比例する大きさを持つ力) がボールに作用し、打球に大きな運動エネルギーを与えることができたものと考えられる. また、被験者 B, C については、打球の運動エネルギーの変動を説明する因子としてスイング特性を表す変数が一切選択されなかった. この被験者 B, C について、スイング特性を表す変数が打球の運動エネルギーの変動を説明する因子として選択されなかったのは、被験者 B, C のヘッド速度のばらつきが他の被験者に比べて小さかった (表 3-5) ことが主な理由と考えられる. この 2 名の被験者は、打球の運動エネルギーの Z-score がそれぞれ B: -1.34, C: -2.00 であり (表 3-6), 正規分布の下位 10% 以内であった. このうち被験者 B は、打球角度の Z-score が 2.56 となり他の被験者と比較

して上位 1% の範囲内となった (表 3-6)。すなわち被験者 B については、より大きな入射角をとる斜中心衝撃でインパクトしたことによって、打球角度が大きなフライとなる傾向が強かったため、結果的に運動エネルギーが小さくなったと考えられる。

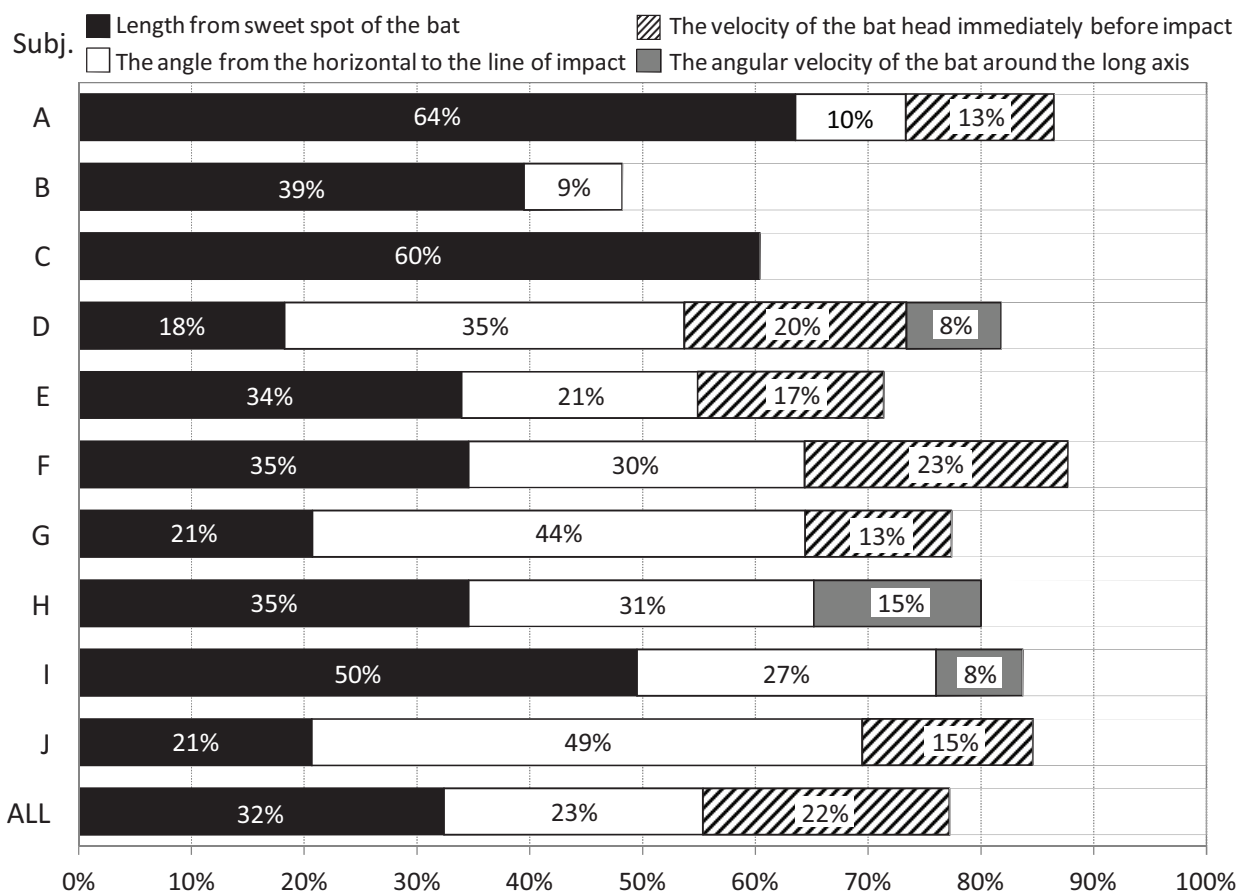


図 3-9 打球の運動エネルギーの変動に対するスイングとインパクトの貢献度。図中の数値 (%) は、スイングとインパクトの各変数が打球の運動エネルギーの変動を何%説明できたかを示している。

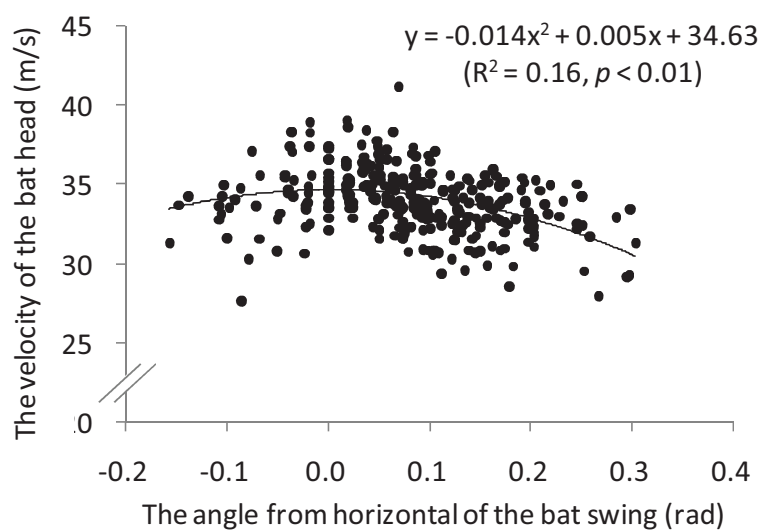


図 3-10 スイング角とヘッド速度との関係

表 3-5 被験者ごとのヘッド速度と、ヘッド速度とインパクトパラメータの相関関係

Subjects	V_{head} (m/s)			Correlation		
	Mean \pm SD	max - min		$V_{\text{head}} - r_{\text{ss}}$	$V_{\text{head}} - \theta_{\text{impact}}$	$r_{\text{ss}} - \theta_{\text{impact}}$
A n=23	32.9 \pm 1.9	7.9		-0.34	0.02	-0.16
B n=30	32.3 \pm 1.0	4.6		0.23	0.05	-0.09
C n=18	30.7 \pm 0.7	2.6		-0.03	-0.50 *	0.15
D n=38	34.1 \pm 1.5	8.9		-0.01	-0.44 **	0.18
E n=29	33.5 \pm 1.3	5.4		-0.04	-0.27	0.13
F n=40	35.3 \pm 2.4	10.3		-0.37 *	0.03	-0.14
G n=40	34.4 \pm 1.6	9.0		-0.41 **	-0.37 **	0.07
H n=34	35.7 \pm 1.6	7.0		-0.35 *	-0.32	0.33
I n=36	34.2 \pm 1.1	5.5		-0.29	-0.16	-0.06
J n=18	34.5 \pm 1.5	6.4		0.13	-0.16	-0.32

表 3-6 被験者ごとの打球の運動エネルギーと打球の上下角の平均値と Z スコア

Subjects	$E_{\text{ball/post}}$ (J)			θ_{batted} (rad)		
	Mean	\pm SD	Z-score	Mean	\pm SD	Z-score
A	103.8	\pm 18.8	-0.07	0.19	\pm 0.46	-1.10
B	87.7	\pm 14.1	-1.34	0.58	\pm 0.42	2.56
C	79.2	\pm 18.2	-2.00	0.31	\pm 0.46	0.05
D	114.7	\pm 16.4	0.78	0.23	\pm 0.36	-0.72
E	103.1	\pm 16.5	-0.13	0.31	\pm 0.35	0.06
F	102.2	\pm 25.3	-0.20	0.32	\pm 0.34	0.10
G	111.2	\pm 20.8	0.51	0.33	\pm 0.37	0.21
H	120.8	\pm 18.9	1.26	0.25	\pm 0.34	-0.55
I	111.9	\pm 21.7	0.56	0.25	\pm 0.32	-0.58
J	112.8	\pm 16.6	0.63	0.30	\pm 0.37	-0.04

3.7 各被験者におけるヘッド速度とインパクトパラメータのトレードオフ

被験者 F, G, H はヘッド速度と芯からの距離との間に負の相関関係が認められ ($p < 0.05$, 表 3-5), 被験者 C, D, G はヘッド速度と衝撃線角度との間に負の相関関係が認められた ($p < 0.05$, 表 3-5). これより, 被験者 F, G, H はヘッド速度が大きな試技ほど芯からの距離が近く, 被験者 C, D, G はヘッド速度が大きな試技ほど衝撃線角度が小さくなることが示された. また, 被験者 G はヘッド速度が大きかった試技ほど, 芯からの距離が小さく, 衝撃線角度が小さかった. すなわち, 被験者 C, D, F, G, H は, ヘッド速度を高めるようなスイングを行うことができた試技ほど正確なインパクトを行うことができた, あるいはヘッド速度を大きくできなかった試技ではインパクトの正確性も欠いていたと考えられる. 本研究では被験者に全力で打ち返すよう指示を与えたが, 各被験者のヘッド速度の最大値と最小値との間には 2.6 ~ 10.3 m/s もの差がみられた. すなわち, ヘッド速度が小さかった試技では打者自身の最良なスイングができておらず, それに伴ってインパクトの正確性が低下したと考えられる.

芯からの距離と衝撃線角度との間には全ての被験者で相関関係が認められなかった ($p > 0.05$, 表 3-5). また, 全ての被験者でヘッド速度に対して, 芯からの距離と衝撃線角度

との間に正の相関関係が認められなかった (表 3-5)。これらの結果は、いずれの被験者においても、ヘッド速度を低下させることでインパクトの正確性を高めるといったトレードオフの関係がみられなかったことを示しており、バットの短軸方向についてヘッド速度とインパクトの正確性との関係を報告した先行研究 (高木ら 2008) を支持する結果となった。すなわち、結果としてヘッド速度が低下した試技では、各打者にとって適切なタイミングでスイングを開始できなかったか、あるいは予測したインパクト位置との誤差を補填するために、加速中のヘッド速度やバットの軌道とインパクトのタイミングを不自然な形で調節したことが、インパクトの正確性を欠いた要因として考えられる。以上のことから、スイング特性とインパクトパラメータとの間にトレードオフの関係が示されなかった野球のバッティングにおいて、運動エネルギーの大きな打球を放つためには両者を相互に高めることが重要と考えられる。すなわち、打球の運動エネルギーを高めるために、打者は投球されたボールに対して的確なインパクト位置へスイングする方策として、投手により投げられたボールに対し、常に大きなヘッド速度を導くための自身の最良のスイングを行うことを重視すべきと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果，ゴロやフライも含めた全てのフェアグラウンドへ放たれた打球のうち，運動エネルギーの大きな試技は，低い弾道かつ並進速度の大きなライナー性の打球であることが明らかとなった．また，被験者内における打球の運動エネルギーの変動を説明する因子は被験者により大きく異なったが，インパクトパラメータが全ての被験者で 48 ～ 76 % と高い貢献度であったことから，運動エネルギーの大きな打球を放つためには正確なインパクト位置へスイングすることが最も重要であることが示された．さらに，打撃技術に関して，全ての被験者でインパクトパラメータとスイング特性の間にトレードオフの関係はみられず，運動エネルギーの大きな打球を放つことができた試技では，大きなスイング速度で正確なインパクトを行っていたことが示された．

付録 1

硬式野球ボールは、ボールの中心からコルク・ゴム材・毛糸・綿糸・牛革が順に覆い被さるようになっている。実際に実験で使用したボールのひとつを分解し、各材料の密度を計測した結果、コルク+ゴム材 = 1.02 [g/cm³], 毛糸 = 0.64 [g/cm³], 綿糸 = 0.99 [g/cm³], 牛革 = 0.62 [g/cm³] となった。この結果は、ボール全体の密度が一様でないことを示すが、これらの違いを考慮して算出したボールの慣性モーメント ($7.5 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$) と、本研究で用いた密度一様モデルの慣性モーメント ($7.7 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$) とはほぼ一致していた。

第4章 『流し打ち』の打球方向とインパクトの関係

第1節 流し打ち動作における打球方向を決定するインパクト特性

1. 諸言

野球のバッティングには、『流し打ち』や『引っ張り』といった打球を左右方向へ打ち分ける打撃技術が存在し、打者は主にヒットエンドランや進塁打などが要求される場面で、この打ち分け技術を必要とする。とりわけ流し打ちは、インパクトのタイミングを意図的に遅らせるといった高度な技能が必要と考えられているため、選手間差が大きい打撃技術といえる。McIntyre and Pfautsch (1982) は頭上から打撃フォームを撮影した結果、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をライト側へ向けていたことを報告している。この現象は、これまでインパクトの瞬間におけるバットのライト側への傾斜（右打者を想定）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ライト方向へ放たれるものとして捉えられてきた。

斜め衝突に伴う打球の飛翔方向の変化は、対象物となる物体の表面（バットの打撃面）に対するボールの相対速度ベクトルを、法線方向と接線方向に分類して考えることが一般的である（Cross 2005, Cross 2006）。法線方向の打球速度は、反発係数と衝突直前のバットに対するボールの相対速度によって決定される。一方、接線方向の打球速度は衝突時の摩擦力が影響するため、ボールとバットの接触面における接線方向の相対速度が規定因子の一つとなる。すなわち、バットの方位と打球の飛翔方向との関係を正確に解釈するためには、ボールを質点ではなく球体として捉える必要がある。このため、打球の左右角に対してボールの入射角と反射角の関係を明らかにすることは、ひととき複雑な分析を要する。

一方で、打球の飛翔方向の変化をバットの横断面における衝突として分析した研究も報告されている。これらの研究では、数値シミュレーションを用いてバットの短軸方向に対する斜め衝突の関係を検討しているが（Watts and Baroni 1989, Sawicki et al. 2003）、打球の方向とバットの方位との関連を検討した従来の研究は、以下の2つの重大な仮定に基

づいている：①長軸・短軸それぞれの斜め衝突を，独立した平面運動として検討していること，②インパクト時のバットの長軸は，水平面に位置すると潜在的に仮定していることである．実際の打撃は，スイング中にバットヘッドの位置が大きく上下することや (Crisco et al. 2002, Fleisig et al. 2002, Tabuchi et al. 2007)，インパクト時のバットヘッドの位置がグリップエンドよりも低かったことが観察されている (Nicholls et al. 2003, King et al. 2012)．従って，これらの観察結果はインパクト時のバット長軸の方位によってもたらされる斜め衝突や，短軸のアンダーカットによってもたらされる斜め衝突が，接触面の傾斜によって打球に対して左右や上下への方位変化に限定できないことを示唆している．しかしながら，打者の行う実際の流し打ちにおいて，3次元的なバットの方位と打球が放たれる方向との関連を調査した研究は，これまでに行われていない．そこで本研究は (1) 流し打ちにおける左右の打球方向が，水平面上におけるバットの方位によって決定されるのかどうかを調査すること，(2) 流し打ちにおける打球方向を決定するインパクト特性を3次元で明らかにすることを目的とした．

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、東京六大学野球リーグに所属するチームの選手 16 名（身長 1.74 ± 0.04 m, 体重 71.8 ± 4.5 kg, 年齢 20.6 ± 1.3 歳）であり、野球の競技歴はいずれの被験者も 9 年以上であった。全 16 名のうち、右打者が 12 名、左打者が 4 名であったが、方法および結果と考察における打者の表記は、全被験者右打者とみなされるよう変換して記述した。本実験の実施にあたり、早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」による承認を得た。また、被験者には本研究の目的や実験手順などを事前に説明し、実験参加への書面による同意を得た。

2.2 実験試技

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、野球場にて打撃を行わせた。ホームベースより規定の距離離れた地点から、ドラム式マシンを用いて硬式野球ボールを投げた。その際、投げられたボールの速度・角度・回転数が打者のインパクトポイントで一定になるよう設定した。各被験者には、これらの投球に対して試合と同様なスイングで流し打ちを行うよう指示を与えた。なお、自身のフォームを崩さず流し打ちができるコースへの投球のみ打撃させた。このうち、打球飛距離が 40 m 以上、かつ流し打ち方向のファールラインからセンターに向けての扇形 30 度の範囲内に放たれた全ての打球を成功試技とした（図 4-1-1）。これら成功試技を各被験者 10 試技分得られるまで実験を行った。なお、成功試技を 10 試技分収集するまでに要した平均試行数は 36.1 ± 15.0 試技であった。

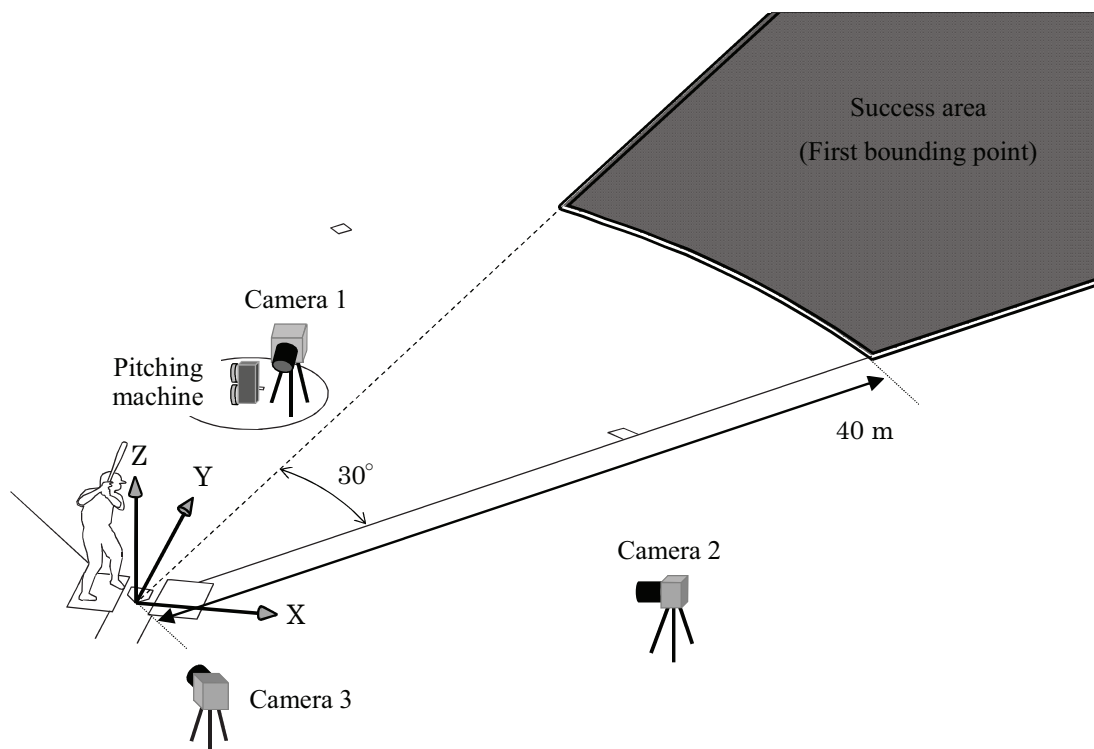


図 4-1-1 実験設定と座標系の定義

2.3 データ収集

打撃動作中のバットとボールの撮影は、電氣的に同期された 3 台の高速度カメラ (Phantom Miro, Vision Research Inc., USA) を用いて、撮影速度 1000 fps, 露光時間 0.2 ms, 画面解像度 800×600 pixel で行った。各カメラを図 4-1-1 のように投手方向, 打者の側方, 斜め後方にそれぞれ設置した。風による打球の飛翔軌道に与える影響を考慮するために、実験開始前にグラウンドから高さ 1.5m 地点の風速を記録した。実験は 3 日間に分けて行ったが、いずれも 1.5 m/s 以下であった。Sawicki et al. (2003) は、風速が 1.0 m/s 変化する毎に打球の飛距離におよそ 2.1 m の影響を与えることを報告している。すなわち、本研究により得られた飛距離には、3 m 程度の誤差が含まれている可能性がある。

2.4 データ処理

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 軸を外積させたベクトルを x 軸として静止座標系 (R_{xyz}) を定義した (図 4-1-1). ボールとバットの挙動は撮影された映像から画像解析ソフトウェア (Frame-DIAS, DKH Inc., Japan) を用いて分析した. ボールのデジタイズ位置はボールの体積中心とし, バットのデジタイズ位置はバットヘッドの中心点, ならびにテープによって貼付されたバットのグリップエンドからヘッドに向かって 0.35 m の位置とした. この時のデジタイズ位置の 3 次元座標を, DLT 法を用いて取得した.

インパクト直前の投球速度 ($V_{ball/pre}$) は, インパクト直前 5 フレームにおけるボールの変位から算出した. 水平投球角度 ($\theta_{H/pitched}$) はインパクト直前 5 フレームにおける水平面上に投影したボール座標の回帰直線の傾きから算出し, 同様に鉛直投球角度 ($\theta_{V/pitched}$) はインパクト直前 5 フレームにおける鉛直面上に投影したボール座標の回帰直線の傾きから算出した. また, バットのヘッド速度 (V_{head}), スイング角度 (バットヘッドの速度ベクトルと水平面とのなす角度: θ_{swing}) は, インパクト直前 3 フレームにおけるバットヘッドの中心点の変位から算出した. バット長軸のスイング角速度 (ω_{swing}) は, バット長軸がインパクト直前 3 フレーム前から 1 フレーム前までに変化した角度を時間微分することにより算出した. 水平バット角 ($\theta_{H/bat}$) は, インパクト時の水平面上に投影したバットと x 軸とのなす角度として算出した (図 4-1-2). また, 鉛直バット角 ($\theta_{V/bat}$) 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 (俯角) として算出した (図 4-1-2).

バットに対するボールのインパクト位置を算出するために, バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) を以下のように定義した. バットのグリップエンドからヘッドに向かうベクトルをバット座標系の x' 軸, x' 軸に直交しかつ水平面を通るベクトルを y' 軸, x' 軸と y' 軸との外積を z' 軸とした. どの程度ボールの下部をインパクトしたかを示す衝撃線角度 (θ_{impact}) は, インパクト時のボールとバットの断面中心を結ぶ線分 (衝撃線) と y' 軸とのなす角度として算出した (図 4-1-2).

インパクト直後の打球速度 ($V_{ball/post}$) は, インパクト直後 5 フレームにおけるボールの

変位から算出した。また、水平打球角度 ($\theta_{H/ball}$) と鉛直打球角度 ($\theta_{V/ball}$) は、投球と同様にインパクト直後 5 フレームにおける座標値の回帰直線の傾きから算出した。打球飛距離 (D_{flight}) は、あらかじめグラウンド上に等間隔 ($5^\circ \times$ 奥行き 10 m 毎) に設置した既知座標のマーカと、観測者が打球の落下地点に置いたマーカをビデオカメラ (EXILIM EX-F1, CASIO Inc., Japan) を用いて、斜め上方から落下地点のマーカとそれを囲む既知座標のマーカが画角に収まるように 30 fps で撮影し、2 次元 DLT 法を用いて得られた落下地点の座標値から算出した。なお、全ての変数の記号および定義を表 4-1-1 に示した。

表 4-1-1 各変数の定義

Symbol	Description
Pitched ball	$V_{ball/pre}$ The velocity of the pitched ball immediately before impact
	$\theta_{H/pitched}$ The angle between y-axis and the direction of the pitched ball projected onto the horizontal plane
	$\theta_{V/pitched}$ The angle from horizontal of the direction of the pitched ball immediately before impact
Swing	V_{head} The velocity of the bat head immediately before impact
	ω_{swing} The angular velocity of the bat immediately before impact
	θ_{swing} The angle from horizontal of the direction of the swing immediately before impact
Impact	$\theta_{H/bat}$ The angle between x-axis and the long axis of the bat projected onto the horizontal plane
	$\theta_{V/bat}$ The angle from horizontal of the long axis of the bat
	θ_{impact} The angle from horizontal of the line of impact
	r_{impact} Length from grip end of the bat to impact point
	r_{ss} Length from sweet spot of the bat to impact point
Batted ball	$V_{ball/post}$ The velocity of the batted ball immediately after impact
	$\theta_{H/ball}$ The angle between y-axis and the direction of the batted ball projected onto the horizontal plane
	$\theta_{V/ball}$ The angle from horizontal of the batted ball immediately after impact
	D_{flight} Flight distance
Material property	m_{ball} Baseball mass
	m_{bat} Bat mass

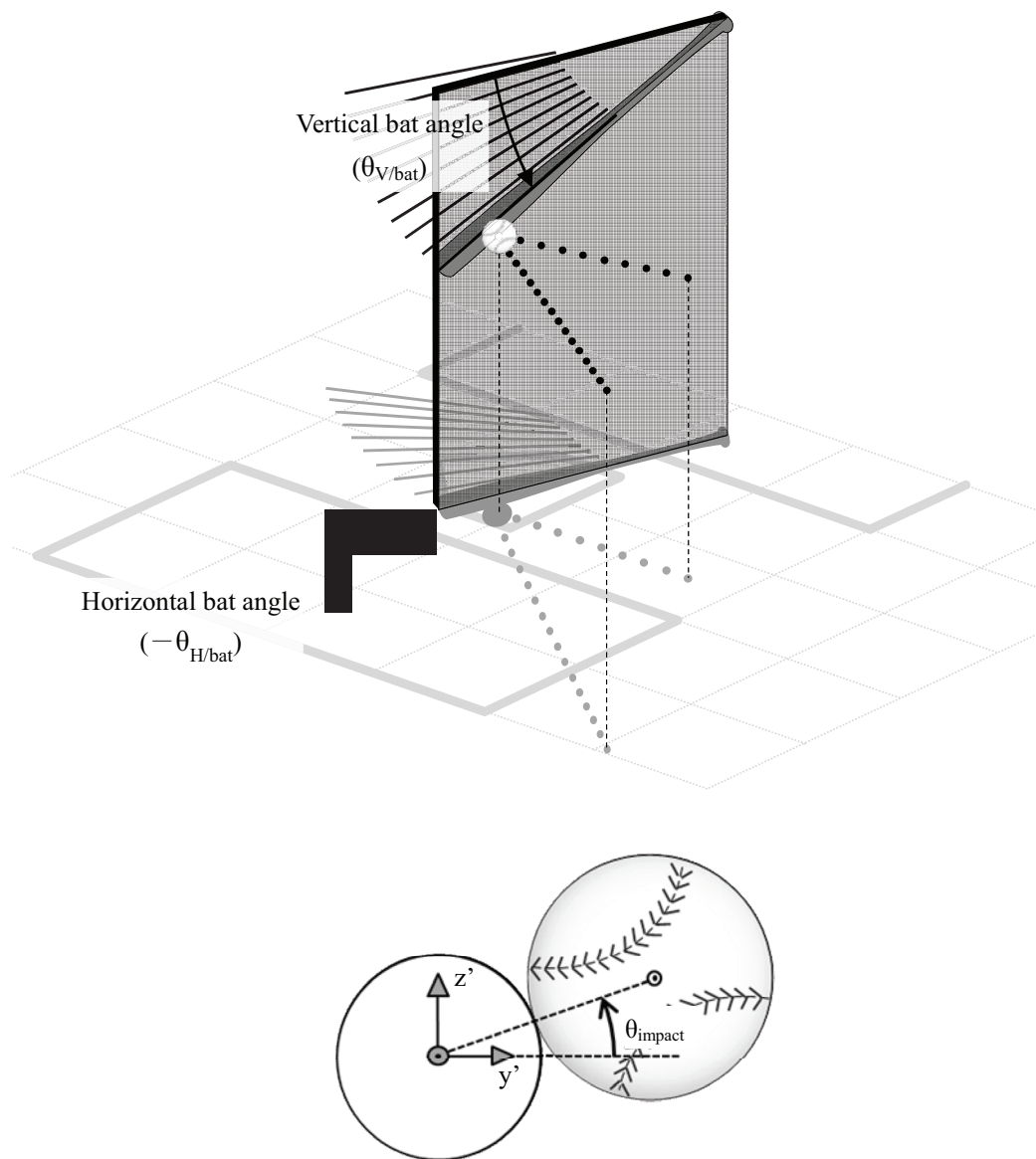


図 4-1-2 水平バット角 ($\theta_{H/bat}$), 鉛直バット角 ($\theta_{V/bat}$), 衝撃線角度 (θ_{impact}) の定義

3. 結果

インパクト直前の投球速度は 28.6 ± 1.6 m/s であり, その軌道は左右方向に $0.0 \pm 0.5^\circ$, 下方向に $5.3 \pm 1.0^\circ$ であった (表 4-1-2). インパクト直前のヘッド速度は 32.7 ± 1.7 m/s, スイング角速度は 2287 ± 147 ° /s であった (表 4-1-2). また, インパクト直前のスイング角は上方向 (アッパースイング) に $4.3 \pm 3.9^\circ$ であり, 最大値 (16.0° : アッパースイング) と最小値 (-7.5° : ダウンスイング) との間に 24.5° もの差がみられた. インパクト時の水平バット角はライト方向に $6.7 \pm 7.3^\circ$ であり, 最大値はレフト方向に 15.0° 傾いていた. また, 水平バット角の最大値 (15.0°) と最小値 (-25.5°) の差は 40.5° であり, この値を本研究で得られたスイング角速度の平均値 (2287 ° /s) で除すと, 0.0177 s となった. 鉛直バット角は $27.9 \pm 6.1^\circ$ であり, 全ての試技でバットヘッドが斜め下向きに傾斜していた. 衝撃線角度は $19.2 \pm 6.3^\circ$ であり, 最大値 (37.3°) と最小値 (7.0°) との間には 30.3° の差がみられた.

打球はセンターラインから $22.4 \pm 7.6^\circ$ 流し打ち方向へ, $25.6 \pm 10.9^\circ$ 上向きに 35.8 ± 2.7 m/s の速度をもって放たれた (表 4-1-2). 打球飛距離 (76.9 ± 12.0 m) は, 最大値 (101.9 m) と最小値 (46.8 m) との間には 55.1 m の差がみられた. 水平バット角と打球の左右角との間には有意な負の相関関係が認められた ($r = -0.04$, $p < 0.01$, 図 4-1-3).

表 4-1-2 各変数の平均値と最大・最小値

		Mean \pm SD	Max.	Min.
Pitched ball	$V_{\text{ball/pre}}$ (m/s)	28.6 ± 1.6	31.2	25.0
	$\theta_{\text{H/pitched}}$ (deg)	0.0 ± 0.5	1.3	-1.4
	$\theta_{\text{V/pitched}}$ (deg)	5.3 ± 1.0	8.1	3.3
Swing	V_{head} (m/s)	32.7 ± 1.7	37.2	28.9
	ω_{swing} (deg/s)	2287 ± 147	2640	1954
	θ_{swing} (deg)	4.3 ± 3.9	16.0	-7.5
Impact	$\theta_{\text{H/bat}}$ (deg)	-6.7 ± 7.3	15.0	-25.5
	$\theta_{\text{V/bat}}$ (deg)	27.9 ± 6.1	42.6	8.5
	θ_{impact} (deg)	19.2 ± 6.3	37.3	7.0
Batted ball	$V_{\text{ball/post}}$ (m/s)	35.8 ± 2.7	42.3	28.1
	$\theta_{\text{H/ball}}$ (deg)	22.4 ± 7.6	38.5	8.6
	$\theta_{\text{V/ball}}$ (deg)	25.6 ± 10.9	56.9	7.7
	D_{flight} (m)	76.9 ± 12.0	101.9	46.8

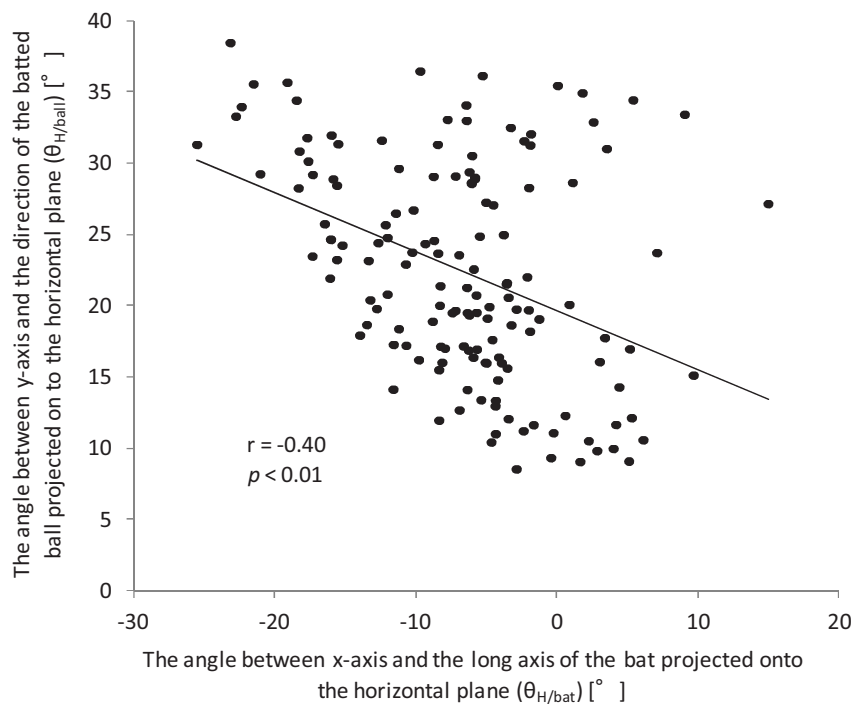


図 4-1-3 水平バット角 ($\theta_{\text{H/bat}}$) と打球の左右角との関係 ($\theta_{\text{H/ball}}$)

4. 考察

4.1 データの妥当性

本研究では、流し打ちのインパクト特性を3次元で明らかにすることを目的として実験を行った。その結果、流し打ちを行わせたのにもかかわらず、水平バット角の最大値はレフト方向に 15° 傾いていたことが明らかとなった。すなわち、バットの打撃面をレフト方向に向けたインパクトであっても、打球をライト方向に放つことが可能なことが示されたことになる。この結果を含め、本研究の測定が妥当な値を導出し得るのかどうかを、以下のように確認した。まず、本研究では3次元空間を構築するためのキャリブレーションを、計68点のポイントからなる放射状の校正器を用いて行った。その結果、デジタイズによる既知座標との標準誤差は、3日間で平均 $x = 1.3 \text{ mm}$, $y = 1.4 \text{ mm}$, $z = 1.4 \text{ mm}$ となった。また、分析の精度を検証するために、インパクト時の水平バット角・鉛直バット角・衝撃線角度について、全試技2回のデジタイズを行った。その結果、1回目と2回目のデジタイズによって得られた分析結果の差の絶対値は、最大で水平バット角： 0.87° 、鉛直バット角： 0.29° 、衝撃線角度： 2.22° であった。また、分析の正確性を検証するために、インパクト時のバット長についても全試技2回デジタイズし、既知の長さ (0.84 m) との差を比較した。その結果、2回のデジタイズで最も大きかった誤差は 3.9 mm であった。さらに、水平バット角の最大値 (15°) を記録した試技の側方からの写真やスティックピクチャを確認しても、バットの打撃面はレフト側を向いていた (図 4-1-4)。以上より、分析により得られた本研究の結果は、信頼に足るものと考えられる。

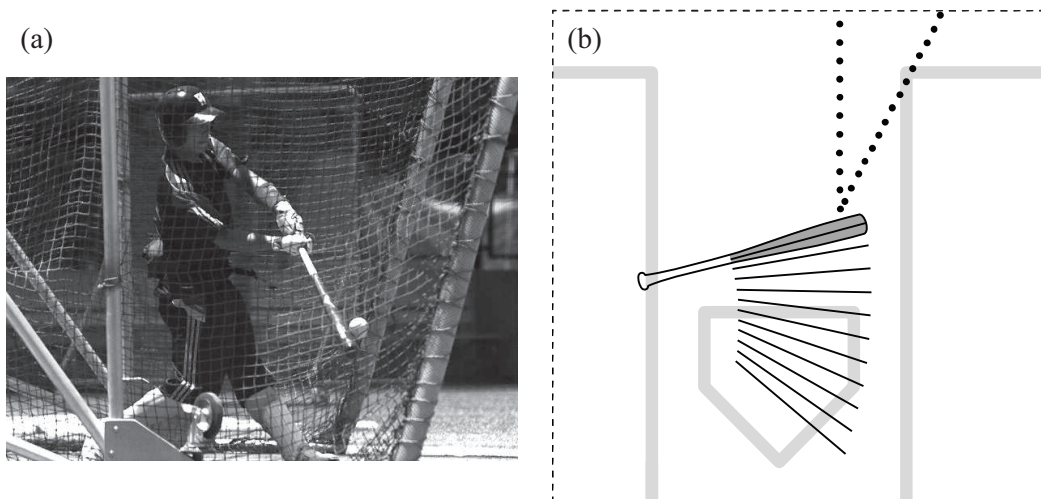


図 4-1-4 バットの打撃面をレフト側に向けて流し打ちを行った試技の写真(a)とスティックピクチャ(b)

4.2 流し打ちの運動学データ

マシンにより投げられたボールは、試技間での変動が小さく、かつ左右方向へのずれも小さかった(表 4-1-2)。すなわち、投球がバットに対して付加的な入射角を生じさせるような状況は、起こり得なかったものと考えられる。また、本研究では、打球がセンターラインから流し打ち方向へ $15 \sim 45^\circ$ の範囲内に落下した試技を対象としていたが、インパクト直後の打球の左右角は $8.6 \sim 38.5^\circ$ であった(表 4-1-2)。放たれた打球が地面に落下するまでの軌跡は、自由落下を仮定し水平面に投影させた場合には一直線となるが、上記の結果は打球が直線的な軌跡をとらなかったことを示している。すなわち、打球の進行方向に対する回転軸の左右への傾きが横向きの揚力を作用させたため、打球が流し打ち方向へ逸れていったものと考えられる。

4.3 水平バット角と打球の左右角との間の関係

水平バット角と打球の左右角との間で得られた相関関係は、バットの打撃面がよりライト側へ向いたインパクトほど、打球もライト側へ放たれていたことを示している(図

4-1-3). しかし、両者の関連は弱く ($R^2 = 0.16$), ばらつきが大きかった. その傾向として、ファールライン際への流し打ちは、バットの打撃面をライト側だけでなくセンターやレフト側へ向けたインパクトでも行われていたものの、右中間方向への流し打ちは、バットの打撃面をセンター方向へ向けたインパクトに集中していた. すなわちこの結果は、水平バット角の大きさによって決定し得る打球方向の範囲が、ライン際への打球ほど広く、右中間方向への打球ほど狭くなっていったことを示している.

4.4 インパクトパラメータのコンビネーション

流し打ちが可能となる 3 次元的なインパクト条件を抽出するために、インパクト時のバットヘッドの位置を球面上にプロットした (図 4-1-5). この図は、球の中心がグリップエンド、経度が水平バット角、緯度が鉛直バット角を示している. また、各プロットのグラデーションが白から黒になるほど、衝撃線角度が大きかったことを示す. 水平バット角が正 (バットをレフト側へ向けたインパクト) の時、大きな鉛直バット角と大きな衝撃線角度を伴ったインパクトによって外野まで放たれる流し打ちを行っていた. これに対し、水平バット角が負 (バットをライト側へ向けたインパクト) の時、比較的広い範囲の鉛直バット角と衝撃線角度によって流し打ちを行っていた. これらの範囲を定量化するため、図 4-1-5 に示されるように凸包を用いて全てのプロットを包含する最小の凸領域を作成し、多角形の面積を算出した. さらに、水平バット角が正の場合と、負の場合それぞれの面積が、全プロットから得られる面積の何%だったのかを算出したところ、バットの打撃面をライト側へ向けての流し打ちは、全体の 7 割を超えていた (77.2%). 本研究により得られたプロットには疎らな部分も存在したが、概ねこれらのプロットを囲むエリアが流し打ち可能なインパクトエリアを示しているものと考えられる. その上でインパクトエリアの形に着目すると、バットをレフト側へ向けたインパクトの場合、鉛直バット角や衝撃線角度が小さなインパクトでは打球がセンターやレフト方向に放たれ、水平バット角が $-30 \sim$

-20° の範囲においては、鉛直バット角が 40° を越えた場合、いずれの衝撃線角度によるインパクトであってもフェールグラウンドへ打球が放たれると予想される。しかしながら、流し打ち可能なインパクトポイントはエリアで存在するため、投手にタイミングを外され意図した水平バット角でインパクトを迎えられなくとも、バットヘッドの上下動や衝撃線角度のコントロールによって流し打ちを行えることが示された。また、鉛直バット角は打者のスイング特性よりも投球されたボールのコース（高低）に依存することが考えられるため、高めに投球されたボールに対しては、バットをライト側に向けたインパクトでなければ流し打ちは行い難いことが考えられる。以上より、流し打ちは水平バット角だけでなく、鉛直バット角や衝撃線角度の組み合わせによって可能となるため、スイングのタイミングに起因するバットの水平角や、鉛直角・衝撃線角度のうちの一つを誤っても、他の因子によってリカバリーできるものと考えられる。

Müller and Loosch (1999) や Müller and Sternad (2004) はダーツを例に、ターゲットの中心 (Bull) を射るには必ずしもリリース位置やリリース角度が統一されている必要がないことを、インプットとアウトプットの間に内在する変動要因として以下の 3 つを提示し、改善策を指摘している。①ノイズの低減（動作の精度を訓練によって高めること）、②課題特有の共変動（動作のコンビネーションによってアウトプットの変動を縮小すること）、③許容範囲（的の大きさなどタスクの達成にはある程度の幅が存在する）である。従って、ターゲットの許容範囲という面では、流し打ちは、鉛直方向への発射角を問わなければ、フェアグラウンド内の左右方向へ 3 等分したうちの一つのエリア内に放たれることで達成される。また、ある方向へ打球を放つために必要なインパクトは 1 通りではなく冗長性を有するため、課題を達成し得るインパクト時の 3 次元的なバットの方位は一つに限定されるものではなく、ある範囲に及ぶものと考えられる。

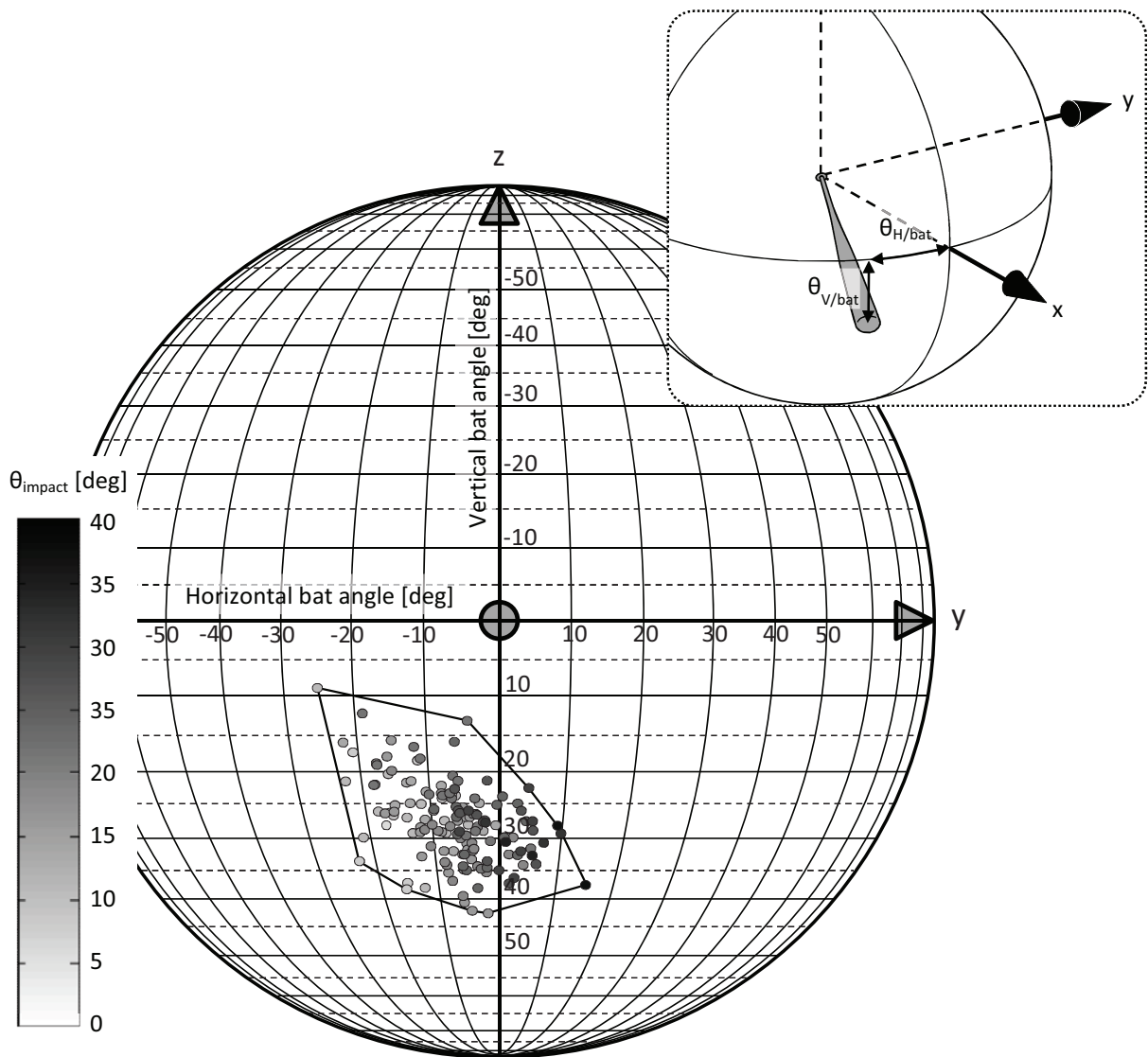


図 4-1-5 球面上にプロットしたインパクト時のバットヘッドの3次元方位. 球の経度は水平バット角, 緯度は鉛直バット角を示しており, 球の中心は右上図のように常にグリップエンドとなる. 各プロットの色は, 衝撃線角度が大きなインパクトほど黒色となる.

4.5 流し打ちを可能にするインパクトメカニズム

バットの打撃面をセンターやレフト側へ向けたインパクトであっても、何故流し打ちが可能であったのかを考察する。まず、バットの打撃面がセンター方向に向き（水平バット角 0° ）、かつバット長軸が水平面上に位置したインパクト（鉛直バット角 0° ）であった場合を想定する。インパクト直前のバットの速度ベクトルを無視すると、インパクト直後の打球はバットに直交する面上での運動とみなすことができる。以上を踏まえ、バットの上部にボールが衝突すると、打球はセンター方向にライナーまたはフライが飛翔する(図 4-1-6a)。一方で、このインパクトをバットヘッドがグリップエンドよりも下に位置した場合を考えると、バットに直交する面が鉛直バット角と同じだけ傾く（図 4-1-6b）。インパクト直後の打球の方位を水平面に投影させると、打球はライト方向にフライが放たれることになる。すなわち、鉛直バット角と衝撃線角度が大きなインパクトほど打球はライト方向に放たれるため、センター方向やレフト方向へバットを向けたインパクトであっても流し打ちが可能になるということである。

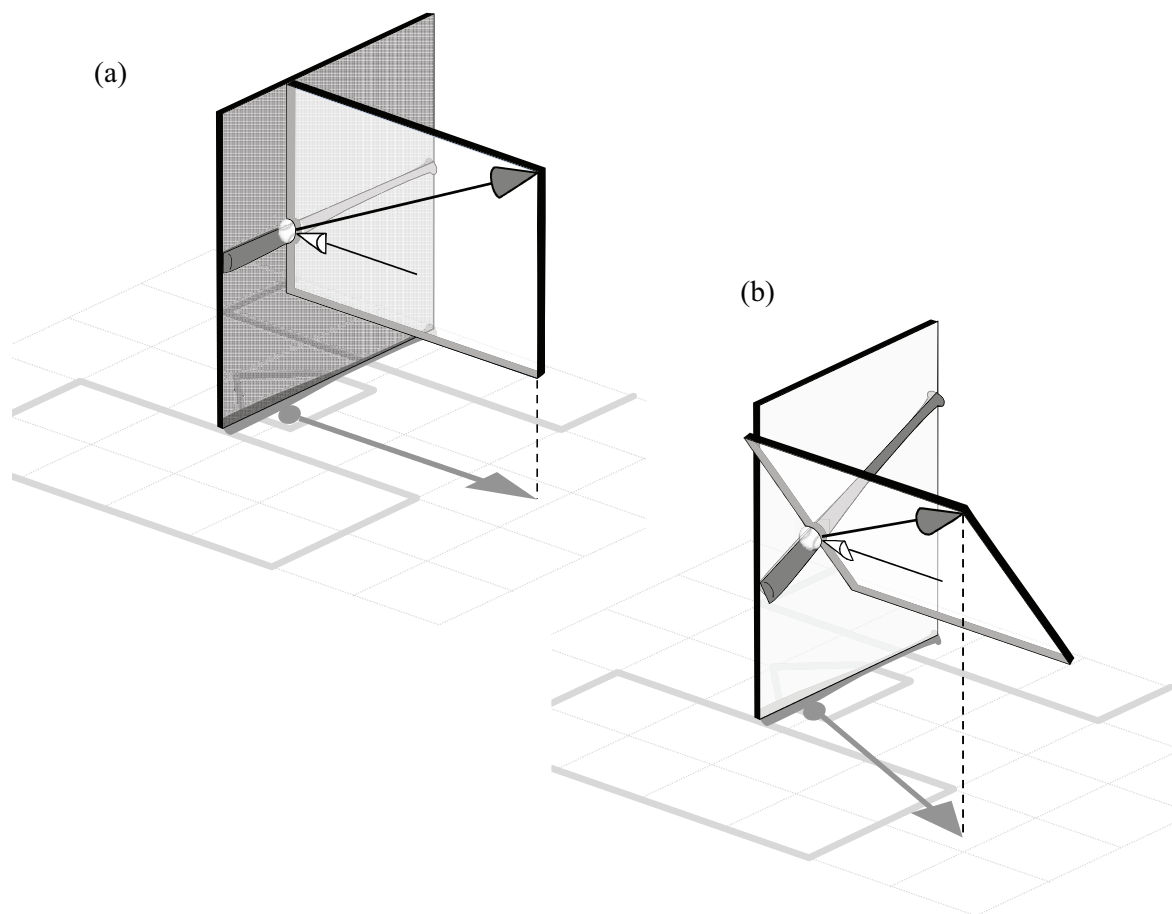


図 4-1-6 流し打ちを可能にする 2 つ目のインパクトメカニズム. (a) : 鉛直バット角 0° でバットの打撃面をセンター方向へ向けたインパクトを仮定する. バットの上部にボールが衝突すると, 打球はセンター方向にフライが放たれる. (b) : 同じ状況で, バットヘッドを下向きに傾斜させると, 打球はライト方向へライナー, またはフライが放たれる.

5. まとめ

本研究の結果，流し打ちにおける左右の打球角度は，インパクト時の水平バット角のみでは説明されず，鉛直バット角と衝撃線角度の相互作用による影響も受けることが明らかとなった．この影響によって，右打者を想定した場合，バットの打撃面をセンターやレフト方向へ向けてインパクトしても流し打ちは行えることが示された．

第2節 流し打ちを可能にする2つのインパクトメカニズム：各メカニズムの貢献度

1. 諸言

前節の研究によって、流し打ちを行った際の打球の左右角は、インパクト時における水平面上のバットの方位だけでなく、バットヘッドを下向きに傾斜させることと、ボールの下部を打撃することの相互作用による影響も受けることが明らかとなった。そこで本節では、流し打ちを可能にする上記2種類の打撃方法について、投球に対して入射角を生じさせるようバットの打撃面をライト側へ向けたインパクトに起因する流し打ちを第1メカニズム(図4-2-1)とし、バットヘッドの下向き傾斜とボールの下部を打撃することの相互作用に起因する流し打ちを第2メカニズム(図4-2-2)としてそれぞれ定義した。

実際に打者の行った流し打ちについて、各インパクトメカニズムが打球の方向にどれだけ貢献していたのかを検討した研究はこれまでになく、流し打ちの際にどのような条件でインパクト行うことが、速度や飛距離の大きな打球につながるのかといった具体的方策は、明らかにされていない。そこで本研究の目的は、流し打ちを行った際の各インパクトメカニズムの貢献度の算出方法を提案すること、ならびに熟練した野球選手の流し打ち技術の特徴を、各メカニズムの貢献度の観点から検討することとした。

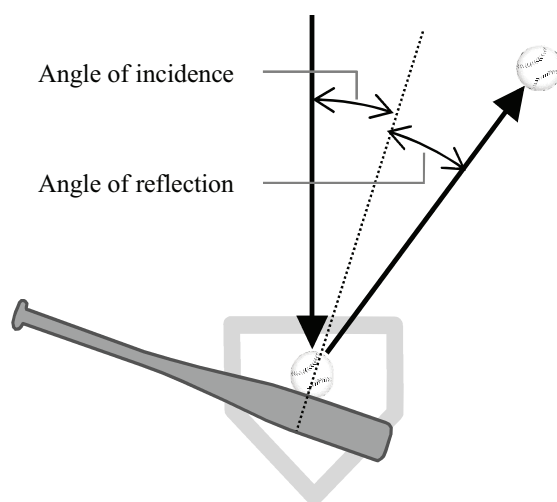


図4-2-1 流し打ちの第1メカニズム

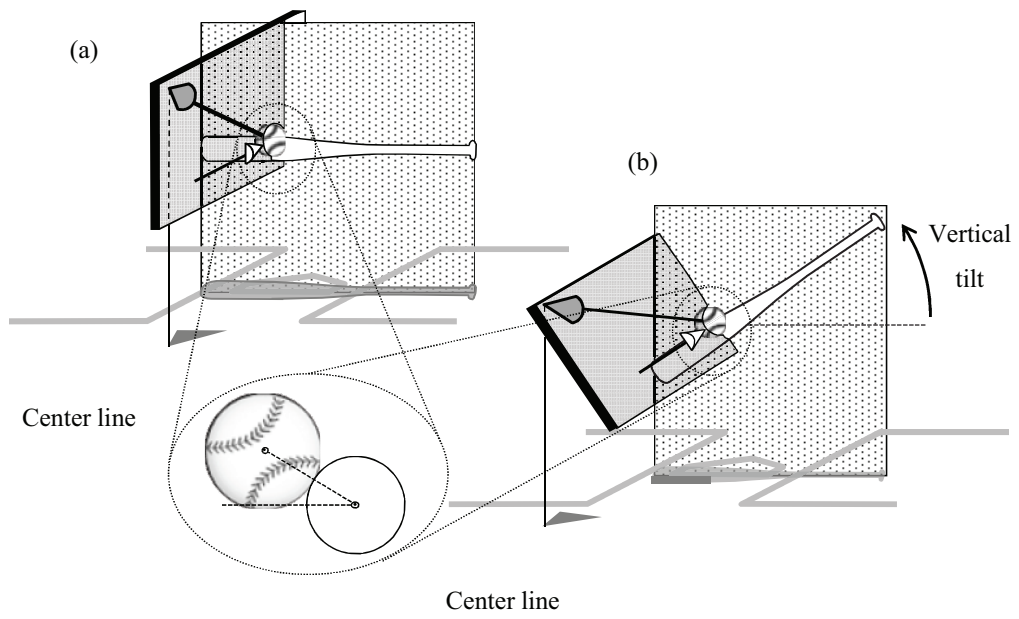


図 4-2-2 流し打ちの第 2 メカニズム

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、東京六大学野球リーグに所属する選手 16 名（身長 1.74 ± 0.04 m, 体重 71.8 ± 4.5 kg, 年齢 20.6 ± 1.3 歳）であり、このうち右打者 12 名, 左打者 4 名であった。また、各被験者の競技歴はいずれも 9 年以上であった。方法および結果と考察における打者の表記は、全被験者右打者とみなされるよう変換して記述した。本実験の実施にあたり、早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」による承認を得た。また、被験者には本研究の目的や実験方法などを事前に説明し、実験参加への書面による同意を得た。なお、本節のデータは第 1 節と同じ被験者から収集した同じデータを用いている。

2.2 実験試技

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、野球場にて打撃動作を行わせた。ホームベースより規定の距離離れた地点から、ドラム式マシンを用いて硬式野球ボールを投じた。その際、投げられたボールの速度・角度・回転数が打者のインパクトポイントで一定になるよう設定した。これらの投球に対して、各被験者に試合と同様なスイングで流し打ちを行うよう指示を与えた。なお、各被験者には自身のフォームを崩さず流し打ちができるコースへの投球のみ打撃させた。このうち、打球飛距離が 40 m 以上、かつ流し打ち方向のファールラインからセンターに向けての扇形 30 度の範囲内に放たれた全ての打球を成功試技とした（図 4-2-3）。これら成功試技を各被験者 10 試技分得られるまで実験を行った。なお、成功試技を 10 試技分収集するまでに要した平均試技数は 36.1 ± 15.0 試技であった。

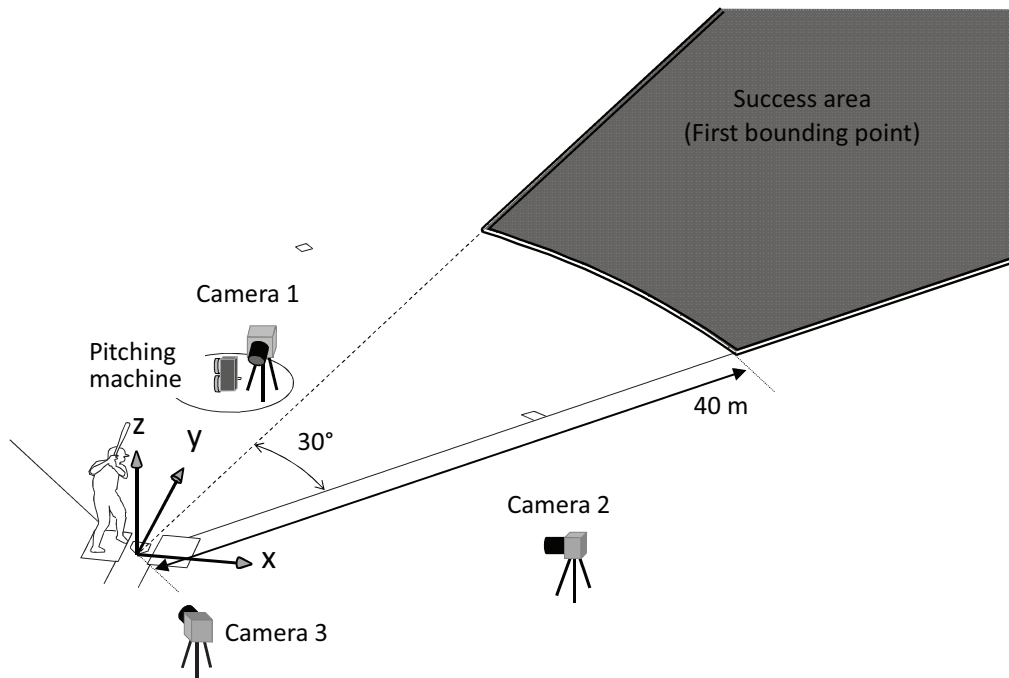


図 4-2-3 実験設定と座標系の定義

2.3 データ収集

打撃動作中のバットとボールの撮影は、電氣的に同期された 3 台の高速度カメラ (Phantom Miro, Vision Research Inc., USA) を用いて、撮影速度 1000 fps, 露光時間 0.2 ms, 画面解像度 800×600 pixel で行った。各カメラを図 4-2-3 のように投手方向, 打者の側方, 斜め後方にそれぞれ設置した。

2.4 データ処理

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 軸を外積させたベクトルを x 軸として静止座標系 (R_{xyz}) を定義した (図 4-2-3)。ボールとバットの挙動は撮影された映像から画像解析ソフトウェア (Frame-DIAS, DKH Inc., Japan) を用いて分析した。ボールのデジタル位置

はボールの体積中心とし、バットのデジタイズ位置はバットヘッドの中心点、ならびにテープによって貼付されたバットのグリップエンドからヘッドに向かって 0.35 m の位置とした。この時のデジタイズ位置の 3 次元座標を、DLT 法を用いて取得した。

インパクト直前の投球速度 ($V_{\text{ball/pre}}$) は、インパクト直前 5 フレームにおけるボールの変位から算出した。水平投球角度 ($\theta_{\text{H/pitched}}$) はインパクト直前 5 フレームにおける水平面上に投影したボール座標の回帰直線の傾きから算出し、同様に鉛直投球角度 ($\theta_{\text{V/pitched}}$) はインパクト直前 5 フレームにおける鉛直面上に投影したボール座標の回帰直線の傾きから算出した。また、バットのヘッド速度 (V_{head})、スイング角度 (バットヘッドの速度ベクトルと水平面とのなす角度: θ_{swing}) は、インパクト直前 3 フレームにおけるバットヘッドの中心点の変位から算出した。水平バット角 ($\theta_{\text{H/bat}}$) は、インパクト時の水平面上に投影したバットと x 軸とのなす角度として算出した。また、鉛直バット角 ($\theta_{\text{V/bat}}$) はインパクト時のバットの鉛直面上における下向き傾斜角度 (俯角) として算出した。

バットに対するボールのインパクト位置を算出するために、バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) を以下のように定義した。バットのグリップエンドからヘッドに向かうベクトルをバット座標系の x' 軸、 x' 軸に直交しかつ水平面を通るベクトルを y' 軸、 x' 軸と y' 軸との外積を z' 軸とした。どの程度ボールの下部をインパクトしたかを示す衝撃線角度 (θ_{impact}) は、インパクト時のボールとバットの断面中心を結ぶ線分 (衝撃線) と y' 軸とのなす角度として算出した。

インパクト直後の打球速度 ($V_{\text{ball/post}}$) は、インパクト直後 5 フレームにおけるボールの変位から算出した。また、打球の水平角 ($\theta_{\text{H/ball}}$) と鉛直角 ($\theta_{\text{V/ball}}$) は、投球と同様にインパクト直後 5 フレームにおける座標値の回帰直線の傾きから算出した。打球飛距離 (D_{flight}) は、あらかじめグラウンド上に等間隔 ($5^\circ \times$ 奥行き 10 m 毎) に設置した既知座標のマーカと、観測者が打球の落下地点に置いたマーカをビデオカメラ (EXILIM EX-F1, CASIO Inc., Japan) を用いて斜め上方から両マーカが画角に収まるように 30 fps で撮影し、2 次

元 DLT 法を用いて得られた落下地点の座標値から算出した。

2.4.1 左右打球角度に対する各インパクトメカニズムの貢献度の算出

各インパクトメカニズムの貢献度は、左右の打球角度に対して第 1・第 2 のメカニズムがそれぞれ流し打ち方向へ何度貢献したかを算出し、その割合 (%) として示した。

2.4.1.1 第 1 メカニズムの貢献度

まず、第 1 メカニズムの貢献度を算出するために、インパクト直前・直後のボールの速度ベクトルを、バットの長軸を通る面 ($R_{x'y'z'}$ 上の $x'-y'$ 面) に投影した成分 ($\vec{v}_{x'y'}/\text{pitched}$ ・ $\vec{v}_{x'y'}/\text{batted}$) に着目する (図 4-2-4)。水平バット角が大きなインパクトほど $x'-y'$ 面上に投影した投球の速度ベクトル ($\vec{v}_{x'y'}/\text{pitched}$) と y' 軸とのなす角度 ($\theta_{\text{inc.}}$) が大きくなり、これに起因して $x'-y'$ 面上に投影した打球の速度ベクトル ($\vec{v}_{x'y'}/\text{batted}$) と y' 軸とのなす角度 ($\theta_{\text{ref.}}$) が大きくなるため、この 2 角の和 ($\theta_{\text{inc.}} + \theta_{\text{ref.}}$) を水平面上に投影した θ_1 も同様に大きくなる (図 4-2-4)。これより、 θ_1 を第 1 メカニズムが流し打ち方向の打球に貢献した角度として定義し、以下の手順により算出した。

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の $x'-y'$ 面上に投影した投球の速度ベクトルと y' 軸とのなす角度 (入射角 : $\theta_{\text{inc.}}$) は、辺 b と c を用いて次式のように表される (図 4-2-4)。

$$\tan \theta_{\text{inc.}} = \frac{b}{c} \quad (1)$$

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の $x'-y'$ 面上に投影した投球の入射角を水平面に投影した角度 ($\theta_{\text{H/inc.}}$) は、辺 a と c を用いて次式のように表される (図 4-2-4)。

$$\tan \theta_{\text{H/inc.}} = \frac{a}{c} \quad (2)$$

式 (2) に式 (1) を代入することで、 $\theta_{\text{H/inc.}}$ が以下のように算出される。

$$\tan \theta_{\text{H/inc.}} = \frac{b \cdot \cos \theta_{\text{V/bat}}}{\frac{b}{\tan \theta_{\text{inc.}}}}$$

$$\tan \theta_{H/inc.} = \cos \theta_{V/bat} \cdot \tan \theta_{inc.}$$

$$\theta_{H/inc.} = \tan^{-1}(\cos \theta_{V/bat} \cdot \tan \theta_{inc.})$$

投球成分と同様に、バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の $x'-y'$ 面上に投影した打球の速度ベクトルと y' 軸とのなす角度 (反射角: $\theta_{ref.}$) は、辺 c と d を用いて次式のように表される (図 4-2-4).

$$\tan \theta_{ref.} = \frac{d}{c} \quad (3)$$

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の $x'-y'$ 面上に投影した打球の反射角を水平面に投影した角度 ($\theta_{H/ref.}$) は、辺 c と e を用いて次式のように表される (図 4-2-4).

$$\tan \theta_{H/ref.} = \frac{e}{c} \quad (4)$$

式 (4) に式 (3) を代入することで、 $\theta_{H/ref.}$ が以下のように算出される.

$$\tan \theta_{H/ref.} = \frac{d \cdot \cos \theta_{V/bat}}{\frac{d}{\tan \theta_{ref.}}}$$

$$\tan \theta_{H/ref.} = \cos \theta_{V/bat} \cdot \tan \theta_{ref.}$$

$$\theta_{H/ref.} = \tan^{-1}(\cos \theta_{V/bat} \cdot \tan \theta_{ref.})$$

以上より、第 1 メカニズムが流し打ち方向に貢献した角度 (θ_1) を投球成分と打球成分の和として算出した.

$$\theta_1 = \theta_{H/inc.} + \theta_{H/ref.} \quad (5)$$

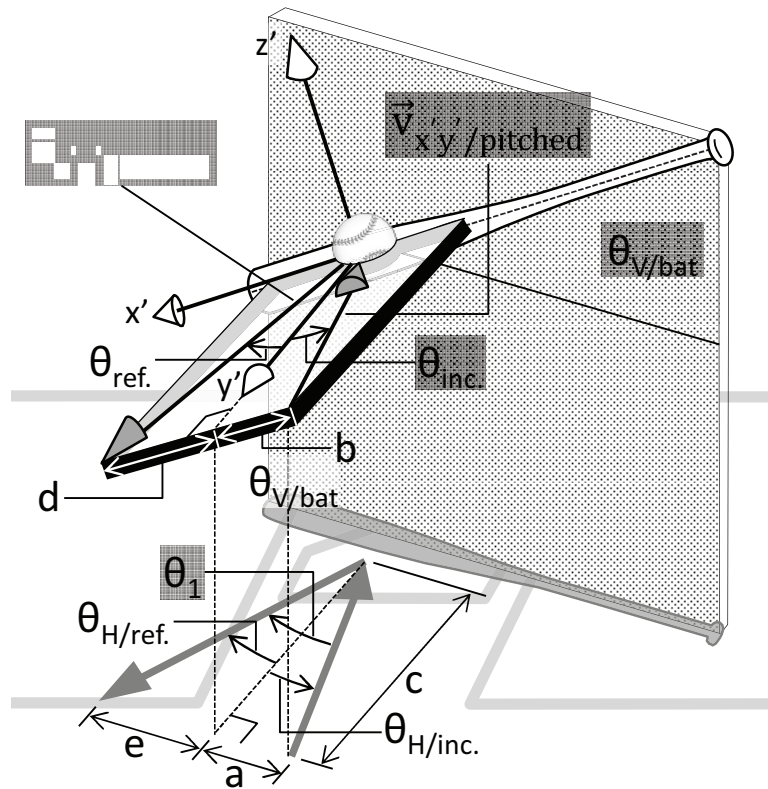


図 4-2-4 第 1 メカニズムの貢献度の算出方法

2.4.1.2 第 2 メカニズムの貢献度

第 2 メカニズムの貢献度を算出するために、インパクト直前・直後のボールの速度ベクトルを、バットの短軸に直交する面 ($R_{x'y'z'}$ 上の $y'-z'$ 面) に投影した成分 ($\vec{v}_{y'z'}/pitched$, $\vec{v}_{y'z'}/batted$) に着目する (図 4-2-5)。衝撃線角度が一定の場合この面上に投影した飛翔方向 ($\theta_{y'z'}/batted$) は既定されるが、鉛直バット角の大きさにより $y'-z'$ 面そのものが傾斜するため、ベクトル $\vec{v}_{y'z'}/batted$ を水平面に投影した打球の飛翔軌道は大きくライト方向に傾く。また、鉛直バット角が一定の場合、衝撃線角度が大きなインパクトほど、 $y'-z'$ 面上に投影した打球の速度ベクトル ($\vec{v}_{y'z'}/batted$) と y' 軸とのなす角度 ($\theta_{y'z'}/batted$) が大きくなるため、それに伴って打球はライト方向へ放たれる。つまり、鉛直バット角と衝撃線角度が大きなインパクトほど、第 2 メカニズムが流し打ち方向に貢献した角度 (θ_2) も大きくなる。さ

らに、貢献度の算出過程に正確性を期すため、投球の速度ベクトルも考慮に入れ、以下の手順により貢献度を算出した。

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の y' - z' 面上に投影した投球の速度ベクトルと y' 軸とのなす角度 ($\theta_{y'z'}/\text{pitched}$) は、辺 h と i を用いて次式のように表される (図 4-2-5)。

$$\tan \theta_{y'z'}/\text{pitched} = \frac{i}{h} \quad (6)$$

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の y' - z' 面上に投影した投球の速度ベクトルを水平面に投影した角度 ($\theta_{\text{pitched}/H}$) は、辺 h と j を用いて次式のように表される (図 4-2-5)。

$$\tan \theta_{\text{pitched}/H} = \frac{j}{h} \quad (7)$$

式 (7) を式 (6) に代入することで、 $\theta_{\text{pitched}/H}$ が以下のように算出される。

$$\tan \theta_{\text{pitched}/H} = \frac{i \cdot \sin \theta_{V/\text{bat}}}{\tan \theta_{y'z'}/\text{pitched}}$$

$$\tan \theta_{\text{pitched}/H} = \sin \theta_{V/\text{bat}} \cdot \tan \theta_{y'z'}/\text{pitched}$$

$$\theta_{\text{pitched}/H} = \tan^{-1}(\sin \theta_{V/\text{bat}} \cdot \tan \theta_{y'z'}/\text{pitched})$$

続いて、打球の速度ベクトルによる第 2 メカニズムの貢献度を算出する。バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の y' - z' 面上に投影した打球の飛翔軌道と y' 軸とのなす角度 ($\theta_{y'z'}/\text{batted}$) は、辺 f と h を用いて次式のように表される (図 4-2-5)。

$$\tan \theta_{y'z'}/\text{batted} = \frac{f}{h} \quad (8)$$

バット座標系 ($R_{x'y'z'}$) の y' - z' 面上に投影した打球の速度ベクトルを水平面に投影した角度 ($\theta_{\text{batted}/H}$) は、辺 g と h を用いて次式のように表される (図 4-2-5)。

$$\tan \theta_{\text{batted}/H} = \frac{g}{h} \quad (9)$$

式 (9) を式 (8) に代入することで、 θ_2 が以下のように算出される。

$$\tan \theta_{\text{batted}/H} = \frac{f \cdot \sin \theta_{V/\text{bat}}}{\tan \theta_{y'z'}/\text{ball}}$$

$$\tan \theta_{\text{batted}/H} = \sin \theta_{V/\text{bat}} \cdot \tan \theta_{y'z'}/\text{ball}$$

$$\theta_{\text{batted}/H} = \tan^{-1}(\sin \theta_{V/\text{bat}} \cdot \tan \theta_{y'z'}/\text{ball})$$

以上より、第2メカニズムが流し打ち方向に貢献した角度 (θ_2) を打球成分と投球成分の差として算出した。

$$\theta_2 = \theta_{\text{batted}/H} - \theta_{\text{pitched}/H} \quad (10)$$

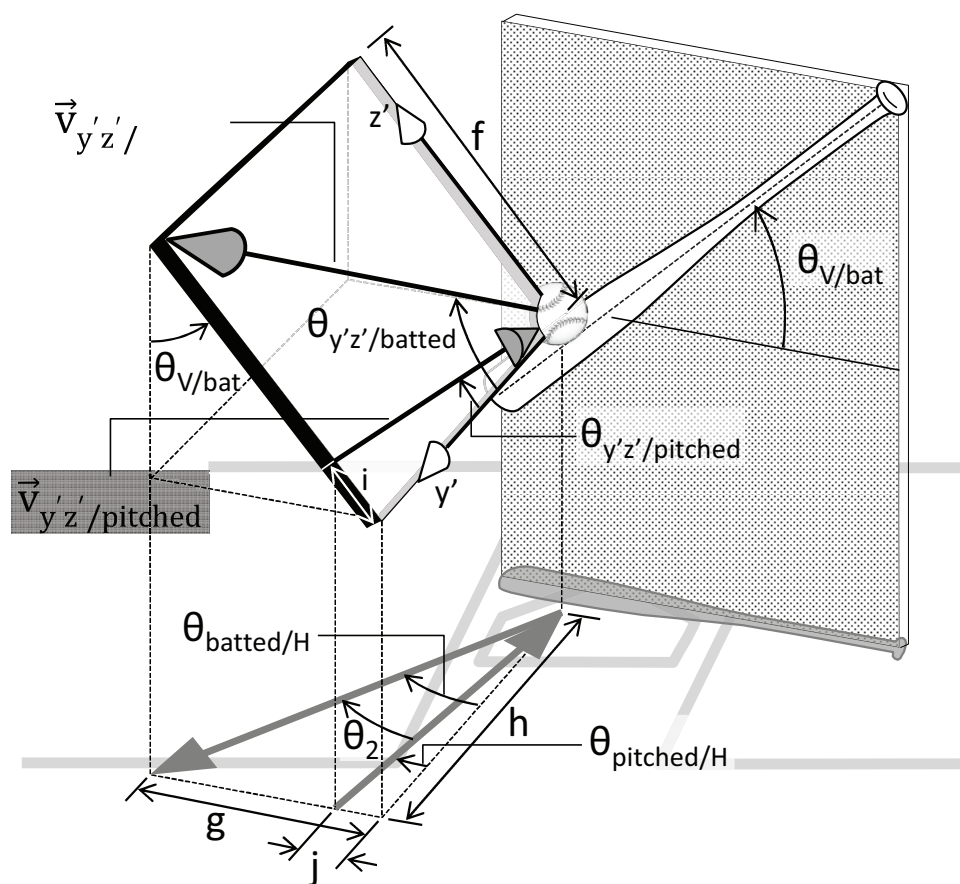


図 4-2-5 第2メカニズムの貢献度の算出方法

最後に、式(5)(10)を利用して、各メカニズムの貢献度 (%) を、そのメカニズムが打球の左右の飛翔方向に貢献した角度 (θ_1 または θ_2) の左右打球角度 ($\theta_1 + \theta_2$) に対する割合とし

て算出した.

$$\text{第 1 メカニズムの貢献度(\%)} = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \times 100 \quad (11)$$

$$\text{第 2 メカニズムの貢献度(\%)} = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \times 100 \quad (12)$$

なお, 第 1 メカニズムに関しては, バットの打撃面をレフト側へ向けた流し打ち (右打者を仮定) の場合, そのメカニズムが打球の左右角に貢献した角度は, 負の値となり得る.

従ってその場合には, 式 (11) で得られる貢献度 (%) も負となる.

2.5 統計処理

スイング特性, およびインパクトパラメータと打球特性の関連を分析するため, 各変数を Pearson の積率相関係数を用いて検定した. 有意水準は 5%未満とした. また, 打球の飛翔方向がインパクト特性によって何%決定されるのかを確かめるために, 打球の左右角を従属変数, 水平バット角・鉛直バット角・衝撃線角度の 3 変数を独立変数としてステップワイズの重回帰分析を行った. 投入する F の確率を 0.05 以下, 除去する F の確率を 0.1 以上とした.

3. 結果

3.1 各メカニズムの貢献度

打球の左右角 ($22.4 \pm 7.6^\circ$) に対して各インパクトメカニズムが貢献した角度は、第1メカニズムが $7.6 \pm 8.3^\circ$ ($-14.3 \sim 30.3^\circ$)、第2メカニズムが $15.7 \pm 8.9^\circ$ ($1.9 \sim 46.9^\circ$) であった。それぞれのインパクトメカニズムによって打球の左右角へ貢献した角度の和 ($\theta_1 + \theta_2$) は、実際に記録した打球の左右角を 97% 説明しており、両者間の回帰直線は $y = x$ となる Identical Line にほぼ一致していた ($R^2 = 0.97, y = 0.99x + 0.27$, 図 4-2-6)。また、インパクトメカニズムの貢献度の平均値は、それぞれ第1メカニズムが $31.1 \pm 35.3\%$ 、第2メカニズムが $69.9 \pm 35.3\%$ であった。また、全 146 試技中 102 試技 (70%) において、第2メカニズムが第1メカニズムよりも流し打ちに大きく貢献していた。一方で、貢献度はインパクト時におけるバットの水平角の変動に伴って 2 次曲線的に変化し、水平バット角が -10.4° 以下の場合には第1メカニズムの貢献が優位となり、 -10.4° 以上の場合には第2メカニズムが優位となる傾向がみられた (図 4-2-7)。

打球の左右角が、貢献度の算出で用いられる 3 変数 (水平バット角・鉛直バット角・衝撃線角度) によって統計的にどの程度説明され得るのかを、ステップワイズの重回帰分析を用いて検定した結果、3 変数全てを独立変数とする有意な回帰式が得られた (表 4-2-1)。その寄与率は 77% であり、推定値の標準誤差は 3.7° であった。

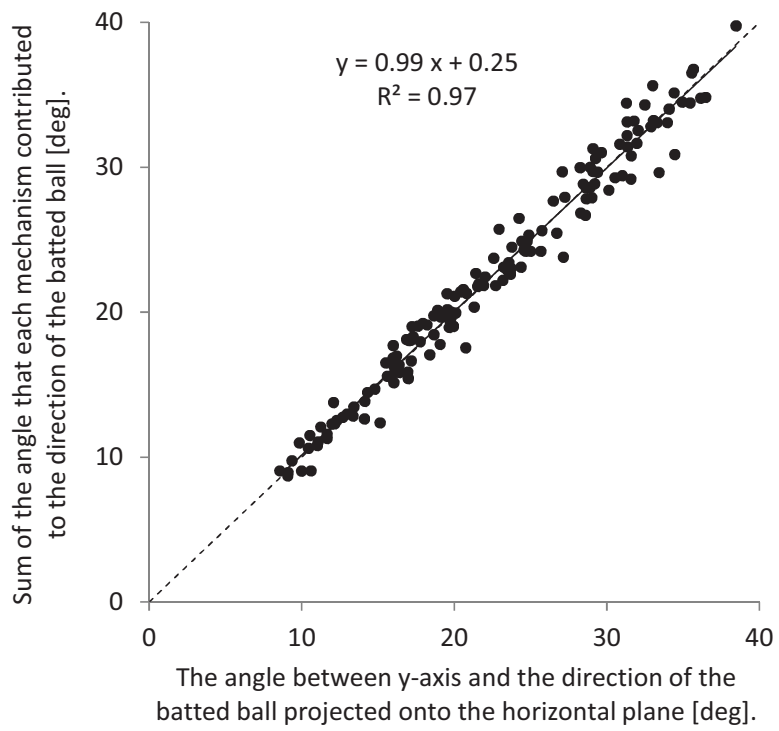


図 4-2-6 実際に記録した打球の左右角と、第1・第2の両インパクトメカニズムが打球の左右角に貢献した角度の和との関係。破線は、 $y=x$ となる Identical line を示す。

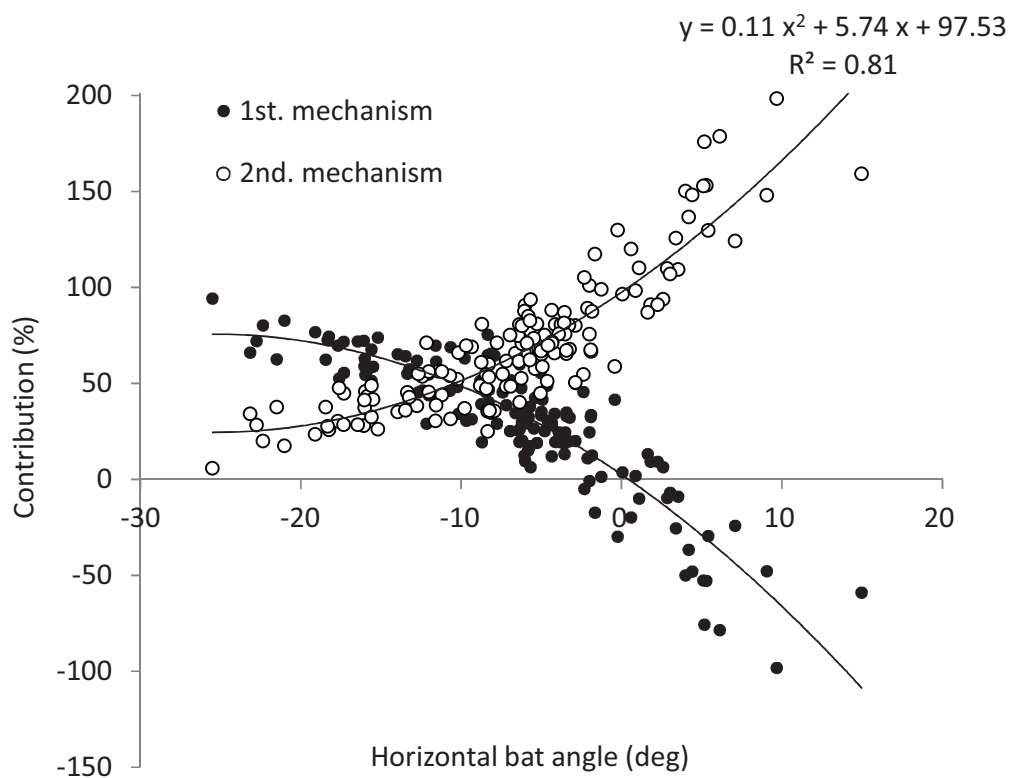


図 4-2-7 水平バット角と各メカニズムの貢献度との関係。両メカニズムのプロットは、対になって一つの試技であり、50%を基準に線対称となるため、常に足して100%となる。

表 4-2-1 ステップワイズの重回帰分析に伴う累積決定係数

Dependent variable	Independent variable	R^2
$\theta_{H/ball}$ (deg)	$\theta_{H/bat}$ (deg)	0.16
	$\theta_{H/bat}$ (deg) θ_{impact} (deg)	0.59
	$\theta_{H/bat}$ (deg) θ_{impact} (deg) $\theta_{V/bat}$ (deg)	0.77

3.2 インパクトメカニズムの貢献度と打球速度, および打球飛距離の関係

第2メカニズムの貢献度と水平バット角の関係を各打球速度, 各打球飛距離について示した(図4-2-8). 打球速度40m/s以上の試技は, 水平バット角が $-17.3\sim 1.6^\circ$ の間にあり, 同一水平バット角でも第2メカニズムの貢献が小さなインパクトであった. 打球飛距離90m以上の試技は, 水平バット角が $-12.0\sim 9.7^\circ$ の間にあり, 同一水平バット角でも第2メカニズムの貢献が大きなインパクトであった. 打球飛距離90m以上の試技における打球速度は $37.4\pm 1.4\text{m/s}$ であった.

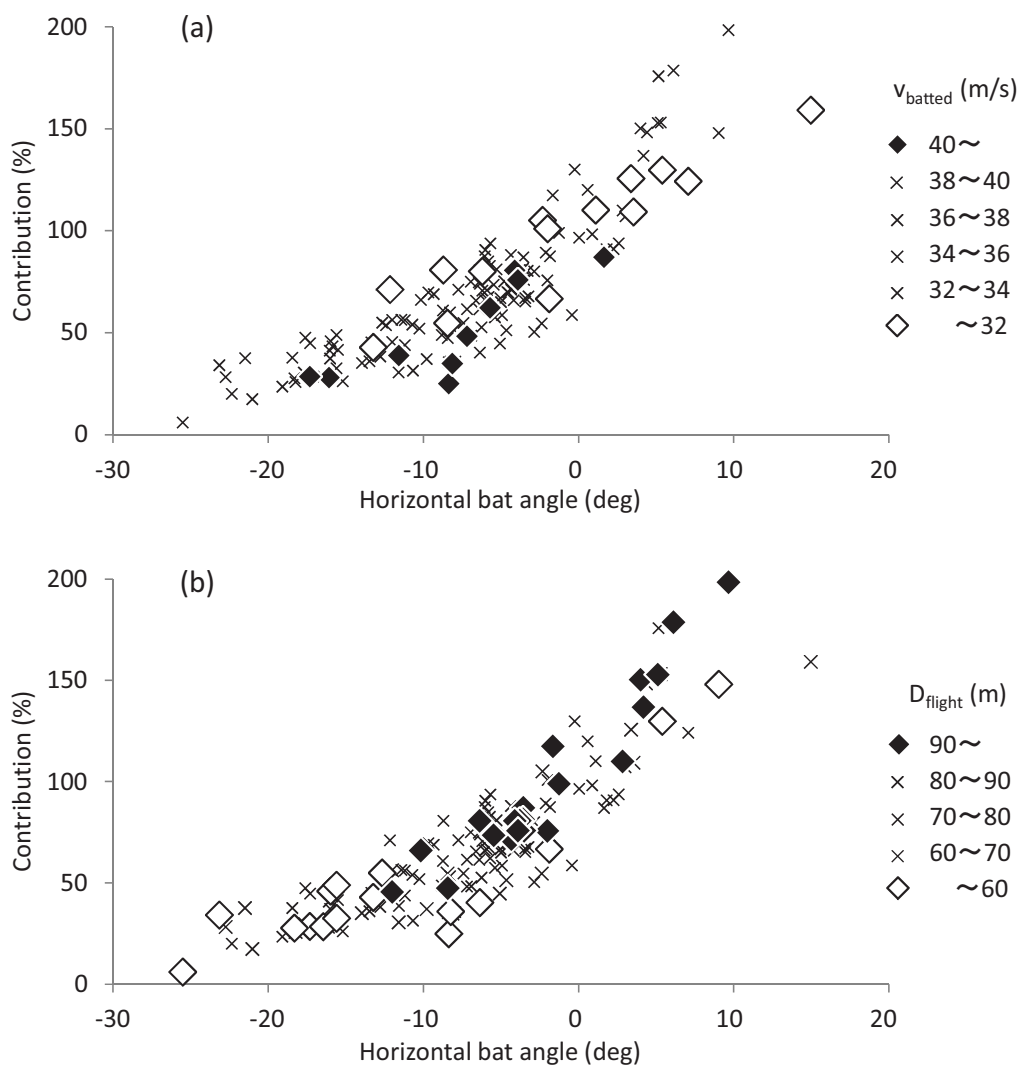


図 4-2-8 水平バット角に対する第 2 メカニズムの貢献度の割合と、打球速度 (a)、打球飛距離 (b) の関係。黒色のひし形は、打球速度が 40m/s 以上(a の場合)、打球飛距離 90m 以上(b の場合)の試技であり、白色のひし形は打球速度が 32m/s 未満(a の場合)、打球飛距離 60m 未満(b の場合)の試技である。

4. 考察

4.1 打球の左右角に対する各メカニズムの貢献度

両メカニズムの打球の左右角に貢献した角度の和が、測定された打球の左右角を 97% 説明できており、かつ系統的な誤差がみられなかったことから (図 4-2-6)、本研究で提案したインパクトメカニズムの貢献度の算出方法は、概ね妥当であったといえる。

ステップワイズの重回帰分析により、3 変数 (水平バット角・鉛直バット角・衝撃線角度) の打球の左右角を説明する寄与率は 77% であった。また、水平バット角のみを投入した時の決定係数 (0.16) に比べ、衝撃線角度と鉛直バット角を投入した後の決定係数の増加分 ($0.77 - 0.16 = 0.61$) の方が大きかったことから、直線回帰による統計手法を用いても第 2 メカニズムの貢献度が大きいことが確認された。そして、打球の左右角に寄与しなかった残りの 23% は、インパクト直前のバットのスピードとその方向の変動によるものが大きいと考えられる。そこで、全試技についてインパクト直前におけるバットの速度ベクトルを算出したところ、バット座標系に対してそれぞれ $v_x = -0.8 \pm 1.1 \text{ m/s}$, $v_y = 26.9 \pm 1.9 \text{ m/s}$, $v_z = 1.8 \pm 2.3 \text{ m/s}$ であった。x 成分はバットの長軸方向の速度であり、この変数がマイナスであったことは、バットがインパクト直前にグリップ側への速度を有していたことを示す。そして、これらの速度の変動 (標準偏差) が、打球の飛翔軌道に少なからず影響を与えていたものと考えられる。

第 2 メカニズムは、貢献度の最小値が 5.9% であり、全ての試技で正の貢献を果たしていた (図 4-2-7)。これは、全ての試技で鉛直バット角が正であった、つまりバットヘッドがグリップエンドよりも下側に位置していたためといえる。また、打者は流し打ちを成功させるために、バットの打撃面をよりライト側へ向けたインパクト ($\theta_{H/bat} \leq -10.4^\circ$) では、第 1 メカニズムが優位となるようなインパクトを行っており、バットの打撃面をセンターからレフト側へ向けてのインパクト ($\theta_{H/bat} > -10.4^\circ$) では、第 2 メカニズムが優位となるような、鉛直バット角と衝撃線角度の大きなインパクトを行っていた。これら

の打撃パフォーマンスに与える影響を次に示す.

4.2 第2メカニズムの貢献度と打球速度, および打球飛距離の関係

打球速度 40m/s 以上の試技は, 水平バット角が $-17.3\sim 1.6^\circ$ の間にあり, 水平バット角が同じでも比較的第2メカニズムの貢献度が小さなインパクトであった (図4-2-8). なお, 打球速度 40m/s 以上の試技における打球飛距離は $77.0\pm 17.7\text{m}$ であった. すなわち, 打球速度の大きな流し打ちを行うためには, インパクトポイントを比較的捕手寄りに置き, 衝撃線角度の小さなインパクトを行うことが必要であると考えられる. 本研究で得られたインパクト直前のスイング角速度は $2287\pm 147^\circ/\text{s}$ であり, 40m/s 以上の打球速度を記録した水平バット角の幅 (18.9°) を 8.3ms で通過することになる. スイングの速度を高めることによって水平バット角の幅は広がる可能性があるものの角速度が増加するために, 概ねこの 8.3ms という速度の大きな打球を放つために許容される時間は変わらず, 流し打ち方向へ速度の大きな打球を放つためにはこのわずかな時間をコントロールする技術が必要と考えられる.

打球飛距離 90m 以上の試技は, 水平バット角が $-12.0\sim 9.7^\circ$ の間にあり, 水平バット角が同じでも比較的第2メカニズムの貢献度が大きなインパクトであった. なお, 打球飛距離 90m 以上を記録した試技の打球速度は $37.4\pm 1.4\text{m/s}$ であった. すなわち, 流し打ち方向へ飛距離の長い打球を放つためには, バットの打撃面を主にセンター方向へ向け, かつ右打者に例えると, ボールの左斜め下を打撃するような鉛直バット角と衝撃線角度の比較的大きなインパクトが必要と考えられる. ボール・インパクトと打球飛距離の関係を2次元剛体モデルで検討した Sawicki et al. (2003) の報告によると, 直球を打撃する場合には 9° のアップスイング, かつボールの中心より 0.0265m 下側 (衝撃線角度に換算すると 21.7°) を打撃することで, 打球が 26.4° 上向きに放たれ, 最長飛距離 (135m) が生まれるとされる. また, 本研究で得られた飛距離 90m 以上の試技における衝撃線角度は

22.3±3.3° であり，打球の上下角は 29.4±5.5° であった．これらの結果は，本研究の結果が Sawicki et al. (2003) の報告に比較的近かったことを示しているが，同時に Sawicki et al. (2003) の衝突モデルが妥当ではない可能性を示すものでもある．バットヘッドが下向きに傾斜することによって，衝撃線角度の変動は打球に対して上下方向だけでなく左右方向にも影響を与える．すなわち，バットヘッドが下向きに傾斜したインパクトほど，衝撃線角度の変動に対して打球の上下角の変動は小さくなる．従って，Sawicki et al. (2003) の衝突モデルを実際の打撃に近づけるようバットヘッドを傾斜させると，打球はさらに低い弾道で放たれることになる．

また，打球速度 40m/s 以上の試技は，打球が 14.1±4.5° 上向きに放たれており，飛距離 90m 以上の打球 (29.4±5.5°) よりも 15.3° 低い弾道で放たれた．以上のように，速度の大きな打球と飛距離の長い打球を放つための方策は同一ではなく，打者は目的に応じた異なるインパクトが必要と考えられる．

5. まとめ

本研究により、流し打ちを行わせた際の左右の打球方向に対するインパクトメカニズムの貢献度の妥当な算出方法を提案した。また、流し打ちは、インパクト時の水平バット角の大きさによってその貢献度が変化していくものの、全試技の70%が水平バット角を利用した第1メカニズムよりも、鉛直バット角と衝撃線角度の相互作用による第2メカニズムの貢献が大きかったことが示された。そして、第1メカニズムが優位となるインパクトほど打球速度が大きく、第2メカニズムが優位となるインパクトほど打球飛距離が長くなる傾向がみられた。

第5章 総括論議

本学位論文では、大学野球選手を対象に、インパクトを含む衝突前後のボール・バットの運動から打球飛距離や打球の運動エネルギーの変動要因を明らかにし、また流し打ちを可能にするためのインパクトメカニズムについて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- I. 並進速度が大きく回転速度の小さな打球ほど飛距離は長く、そのうち直衝突（正面衝突）に近いインパクトによって低い弾道で打球が放たれた場合において、打球の運動エネルギーは大きい。
- II. 打球の飛距離を長くするためには、バットのヘッド速度を高め、アッパースイングとなるようなスイング軌道でインパクトさせることが重要である。また、打球の運動エネルギーを高めるためには、上記2変数を増加させるとともに、大きなローリング角速度（バットの長軸回りの回転速度）を持たせたバットでインパクトさせることが重要である。
- III. バットのスイング特性（スピードとその方向）とバットの芯を基準としたインパクト位置（インパクトの正確さ）が打球の運動エネルギーにどのように貢献するのかを被験者内で検討したところ、打球の運動エネルギーの変動を説明する因子は被験者により大きく異なったものの、インパクトパラメータが48～76%と高い確率で貢献していた。すなわち、運動エネルギーの大きな打球を放つためには、バットの芯付近でボールの中心をインパクトするようにスイングすることが最も重要である。
- IV. 全ての被験者で、スイングの速度とインパクトの正確さとの間にはトレードオフの関係がみられず、運動エネルギーの大きな打球を放つことができた試技では、大きなスイング速度でバットの芯付近をインパクトしていた。
- V. 流し打ちにおける打球の左右角は、水平面上に投影したインパクト時のバットの方位（水平バット角）によってのみでは説明されず、バットヘッドの下向き傾斜（鉛直バ

ト角)とバットの上部への衝突(アンダーカット:衝撃線角度)による相互作用の影響も受けていた.

- VI. 流し打ちを可能にするインパクト特性を貢献度として算出したところ,インパクト時の水平バット角によって貢献度の大きさが変化していくものの,全試技の70%でインパクト時の水平バット角に起因する第1メカニズムよりも,鉛直バット角と衝撃線角度の相互作用に起因する第2メカニズムの貢献が大きかった.

以上の知見は,大学野球選手を対象として得られたものであり,これらの現象については全ての熟練した野球選手に対して一般化できるかどうかは不明である.また,センター返しを対象とした2章・3章の研究では,インパクトパラメータをバットに対するボールのインパクト位置として評価しており,バット自体がどの方向に向いているのかという点には着目していなかった.しかし,4章の流し打ちの研究から明らかにされたように,インパクト時のバットの方位が打球に与える影響は非常に大きく,バットの方位と打球速度との関係についても着目する必要がある.そこで総括論議では,より競技レベルの高いプロや社会人選手のスイングの特徴を導き出し,全ての熟練者に対して一般化できるかを確認する.そして速度の大きな打球がどのようなインパクトによって得られるのかを打球方向毎に検討する.

1. プロ・社会人を含めた熟練した野球選手への一般化

1.1 I：正面衝突の重要性について

2章・3章の研究では、正面衝突によるインパクトの重要性が示された。そこで、同様の結果がより競技レベルの高い選手でも得られるのかどうかを調査するために、プロ野球選手31名と社会人野球選手12名を対象に実験を行った。打球の回転速度や飛距離を計測していなかったため、打球速度を、回転を含んだ打球の運動エネルギーと同等な指標として扱うこととする。その結果、衝撃線とスイング軌道との差【衝撃線角度 - スイング角】と打球速度との間には、 0° 付近を頂点とする2次の回帰曲線が得られた(図5-1)。すなわちこの結果は、ボールに対してより大きな撃力を作用させ得る正面衝突によるインパクトによって、最も大きな打球速度が記録されたことを示している。一方で、この図からは、フライを打ち上げるような大きなアップスイングや、ゴロを叩きつけるようなダウンスイングであっても、正面衝突によるインパクトであれば大きな打球速度が得られるとも解釈できる。そこで、どの方向へ放たれた打球が大きな速度を記録していたのかを図5-2に示した。40m/s以上の速度を記録した打球は、主に下向き 15° から上向き 30° の範囲であった。一方、地面より1mの高さでインパクトしたと仮定すると、 15° 下向きに放たれた打球は、3.7m地点でバウンドすることになる。すなわち、実質的に勢いのある打球を放つための方策を考えると、バウンドの度に減速するような強いゴロよりも、 $0\sim 25^\circ$ 付近のライナー性の打球が有効と考えられるため、これらの打球をもたらすような比較的小さな衝撃線角度(打球速度40m/s以上の場合： $8.9\pm 8.7^\circ$)によるインパクトが有効と推察される。この結果は、3章で得られた大学生を対象として得られたデータ(図3-6)と概ね一致していた。Sawicki et al. (2003)は、 9° のスイング角でインパクトした打球が、上向き 25° の方向に放たれた場合に最も飛距離が長くなると報告しているが、本研究においても 25° を上回る角度で打球が放たれた場合に速度が低下していた。以上を踏まえ、打者は速度の大きな打球を放つためには、投球に対して正面衝突させるようなスイング軌道でイ

ンパクトさせることが重要であり，その上で速度の大きな打球がライナー性の弾道で得られることから，過度なアップースイングで正面衝突させるべきではないといえる。

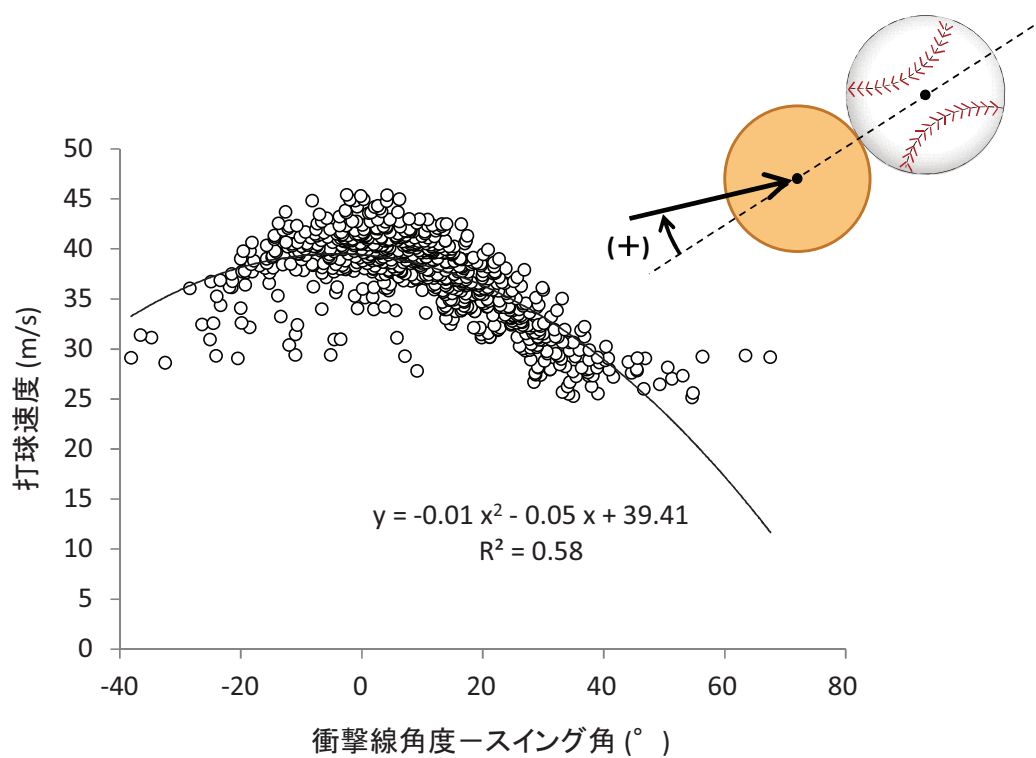


図 5-1 衝撃線とスイング軌道の差[衝撃線角度-スイング角]と打球速度の関係。衝撃線に対してボールの下側を打撃するようなスイング軌道はプラスとなり，ボールの上側を打撃するようなスイング軌道の場合はマイナスとなる。

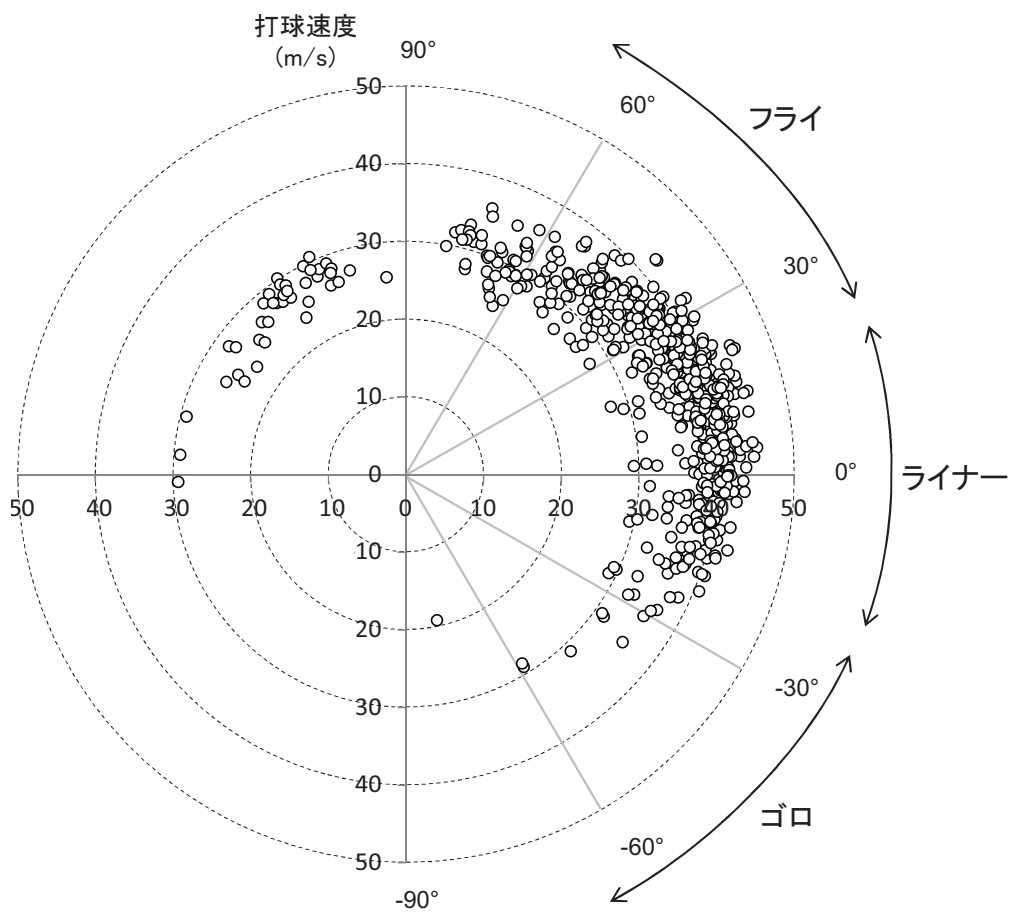


図 5-2 打球速度の分布図. 打球の上下角と打球速度の関係を極座標系上に示したものであり、円の中心から離れたプロットほど打球速度が大きかったことを示している.

1.2 II : 痛烈な打球を放つために必要なスイング

速度の大きな打球を放つために必要なスイングを確かめるために、ヘッド速度と打球速度の関連をみた (図 5-3). 打球速度は、インパクト位置の影響を受けるためにヘッド速度との関連は小さかった. なお、図 5-3 のヘッド速度に対する打球速度の最大値を示す傾斜した青色のラインは、各ヘッド速度で最適なインパクトを行った際にもたらされる最大の

打球速度を示している。そして、このラインは次式によって表される。

$$\text{打球速度(m/s)} = 1.1 \times \text{ヘッド速度(m/s)} + 5$$

この式によると、40m/s以上の打球速度を記録するには、少なくとも31.8m/sのヘッド速度が必要であり、45m/s以上の打球速度を記録するには、少なくとも36.4m/sのヘッド速度が必要である。つまり、大きな速度の打球を放つためにはインパクトの正確さが最も重要ではあるものの、各選手の打球速度の最大値を向上させるには、ヘッド速度を増加させることが必要不可欠である。なお、Nathan (2003) が運動量・角運動量保存の法則を元に導出した式は、バットの芯でインパクトしたことを仮定し、かつ投球速度が加わった次式によって表される。

$$\text{打球速度} = 1.2 \times \text{インパクト位置の速度} + 0.2 \times \text{投球速度} \quad (\text{Nathan 2003})$$

本研究における投球速度にはバラつき (26.2 ~ 33.8 m/s) がみられたが、平均値 (29.4 ± 5.0 m/s) を用いて式に投入すると、次のように表される。

$$\text{打球速度} = 1.1 \times \text{ヘッド速度} + 0.17 \times \text{投球速度}$$

各変数に対する係数がわずかに異なるものの、Nathan (2003) の式と類似していた。すなわち、速度の大きな打球を放つためにはバットの芯で捉えることが最も重要ではあるものの、あるヘッド速度からもたらされる打球速度には上限があるため、上式は打球速度の最大値を増加させるためには、打者自身の持つヘッド速度の最大値を増加させる必要があることを示すものである。以上より、速度の大きな打球を放つためには、ヘッド速度を高めるとともに、前述したようにライナー性の弾道が得られるような正面衝突に近いスイング軌道でインパクトさせることが重要といえる。

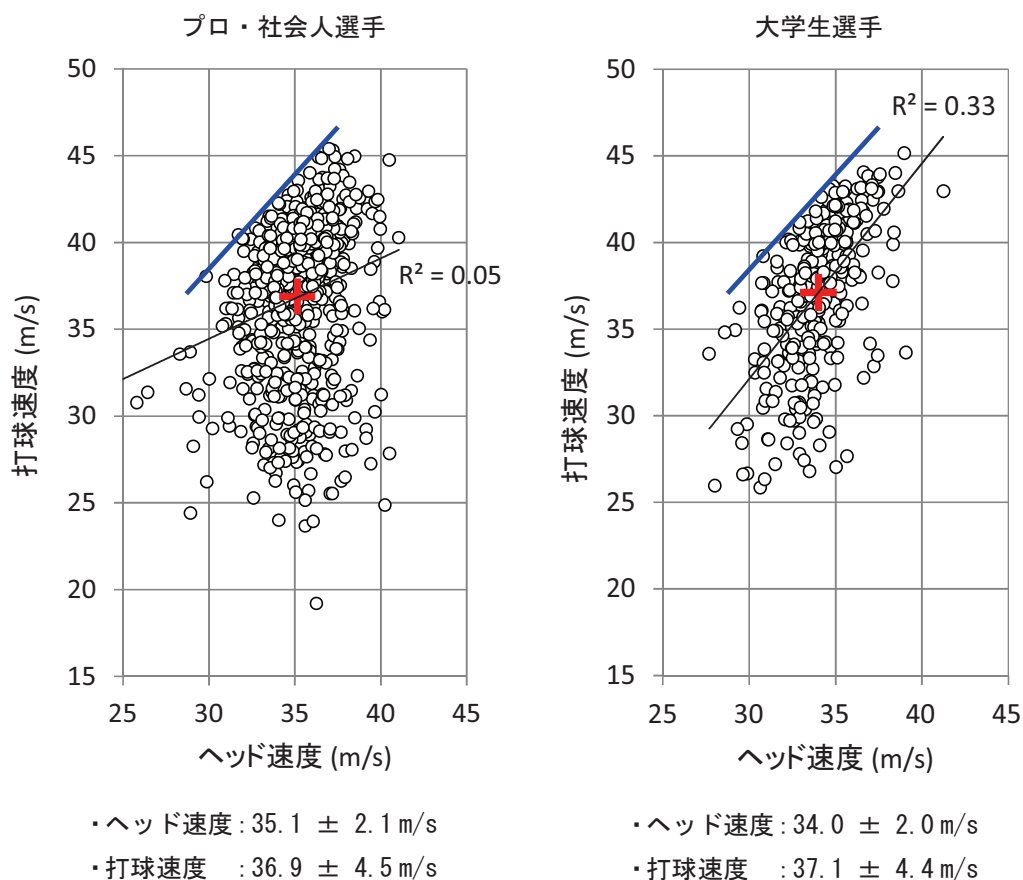


図 5-3 プロ・社会人選手と大学生選手のヘッド速度と打球速度。赤色の十字は平均値を示しており、青色のラインはヘッド速度の変動に対する打球速度の最大値を近似する直線を示している。

1.3 III : スイングとインパクトの打球速度に貢献する割合

3章において、打球の運動エネルギーの変動がスイングの速度とインパクト位置の各変数によってどの程度説明されるのかを、大学生選手を対象に検討した。同様の結果が技術レベルの高い選手でも得られるのかどうかを、上記と同様のデータセット（プロ・社会人選手）を用いて検討した。従属変数を打球速度、独立変数を衝撃線角度・芯から（インパクト位置まで）の距離・ヘッド速度・スイング角とするステップワイズの重回帰分析を行

った。その結果、打球速度の変動はプロ野球選手では78%、社会人選手では77%が独立変数によって説明された(図5-4)。この結果は、大学生選手における全データを用いた場合の寄与率(77%)とほぼ一致していた(図5-4)。一方で、各変数の割合に着目すると、プロや社会人選手の方が、大学生選手よりもスイングによる貢献(ヘッド速度・スイング角)が小さく、インパクト位置による貢献(衝撃線角度・芯からの距離)が大きかった。すなわち、プロや社会人選手の記録した打球速度は、その7割近くがインパクト位置の変動によって左右されたことになり、ヘッド速度の変動による影響は小さかったこととなる。その原因をインパクト位置と打球速度の関係から確認していく。図5-5の各プロットは、バットのどの位置にボールが衝突していたのかを示しており、打球速度によって色が異なる。バットの芯から離れたインパクトほど、打球速度が小さくなっていったという傾向には違いがなかったものの、最も速度の小さな30m/s未満のプロットは、プロ・社会人では芯付近を基準にややグリップ寄り、かつバットの上部への衝突で多くみられた。3章の大学生選手を対象とした実験では、フェアグラウンドへ放たれた試技のみを収集しているが、プロ・社会人選手のデータは、バットに触れた全ての試技を対象としている。このことから、バットの上部への衝突によってファールとなる打ち損じが多かったことが、インパクト位置の影響を強く受けた原因の一つと考えられるが、これらが競技レベルを反映していたかどうかは不明である。また、ヘッド速度と打球速度の関連でみていくと、大学生選手($R^2 = 0.33$)よりもプロや社会人選手($R^2 = 0.05$)の方が、両者の関連が小さかった(図5-3)。以上より、大学野球選手で得られた知見は、競技レベルの高いプロや社会人選手と比較して、打球速度の変動要因に対してインパクト位置の貢献する割合がプロや社会人選手のデータの方が高かったものの、その他は概ね一致していた。しかしながら、ボールインパクトに関して、競技レベルの高い選手が何を持って優れているのかを確認できていないため、これらの特徴を見出すことが今後の研究課題となる。

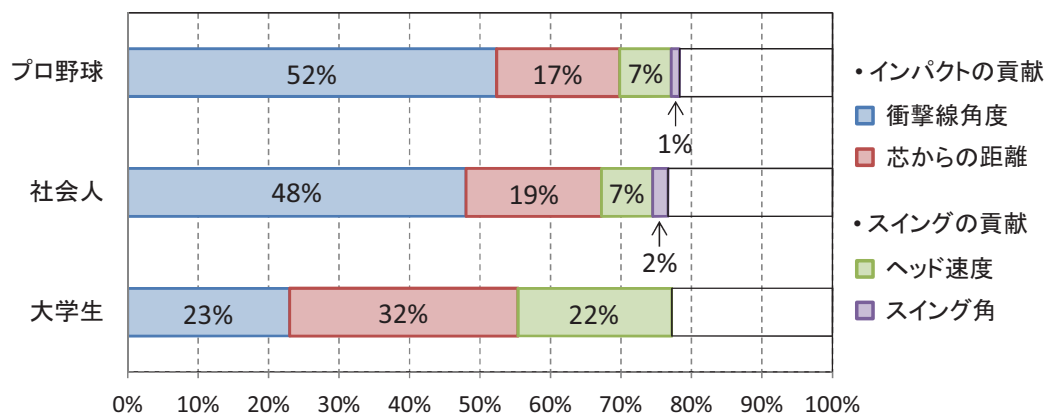


図 5-4 打球速度あるいは打球の運動エネルギーに貢献するスイング特性とインパクトパラメータ。従属変数の変動が、独立変数によって何%説明されたのかを示している。

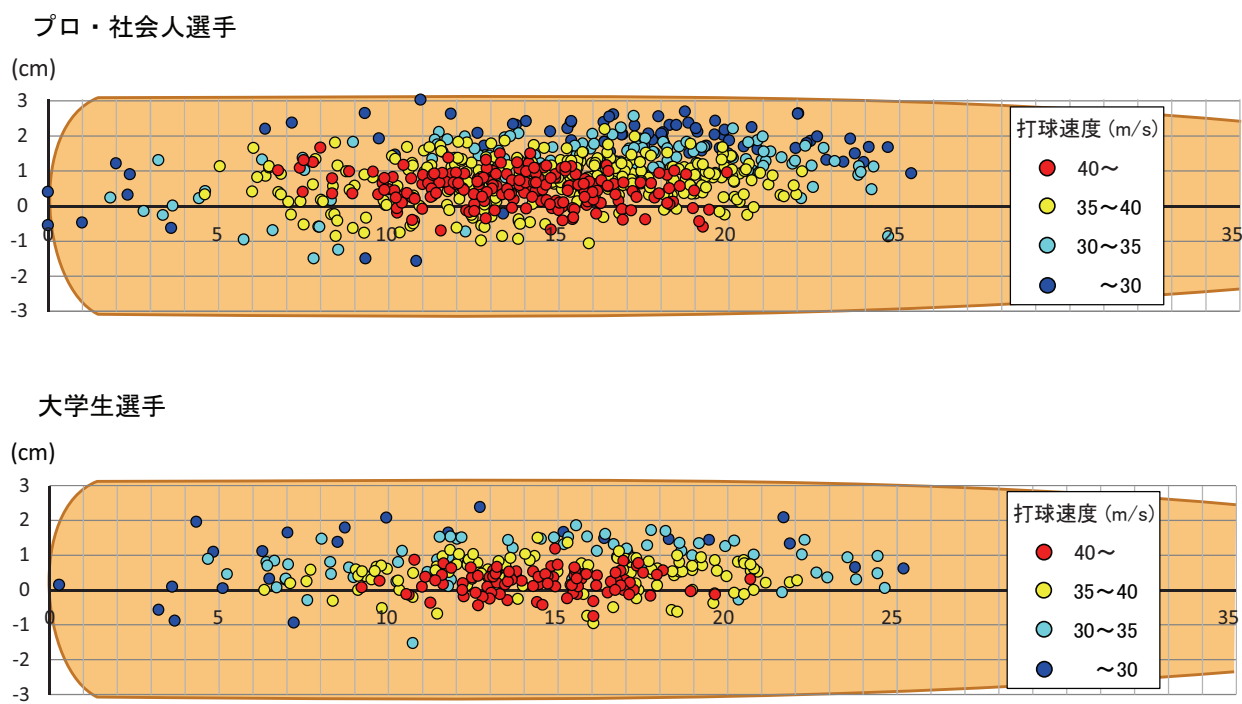


図 5-5 プロ・社会人選手(上段)と大学生選手(下段)におけるバットに対するボールのインパクト位置と打球速度の関係

1.4 IV：スピードと正確さのトレードオフについて

スイングのスピードとインパクトの正確さとの間にトレードオフの関係が存在するかどうかを検証するために、ヘッド速度に対する、衝撃線角度の絶対値と芯からインパクト位置までの距離との関連を検証した(図 5-6)。ヘッド速度と衝撃線角度の間には有意な正の相関が認められ ($r = 0.12, p < 0.01$)、ヘッド速度が大きな試技ほど衝撃線角度が大きかった。すなわちこの結果は、ヘッド速度を抑えることでバットの短軸方向におけるインパクトの正確さを高めていたことを示しているが、両者の説明率は低かった($R^2 = 0.02$)。また、ヘッド速度と芯からの距離の間には有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.04, p > 0.3$)。選手個々のヘッド速度の値が異なるため一概には言えないものの、プロや社会人選手を対象とした場合、スイングのスピードとインパクトの正確さとの間には、バットの短軸方向ではわずかなトレードオフがみられたものの、長軸方向にはトレードオフの関係はみられなかった。従って、バットコントロールを重視するためにヘッド速度を抑えるようなスイングは適しておらず、自身の最良のスイングを心がけることが重要と言えよう。

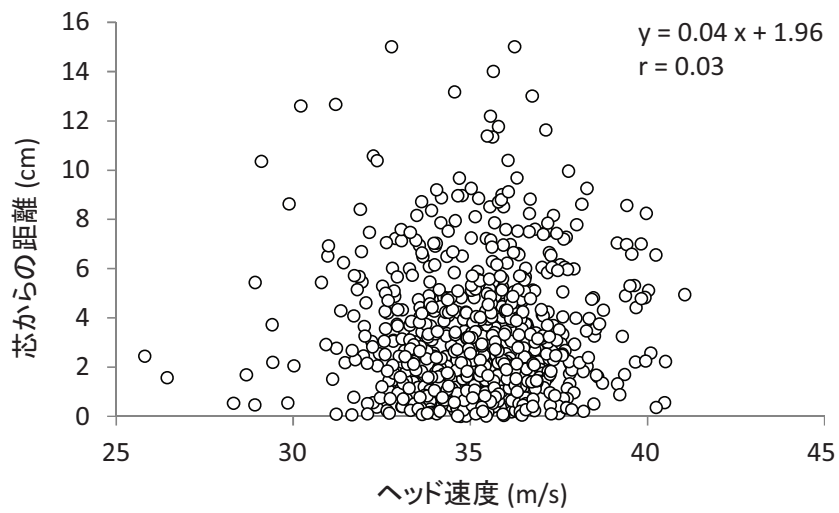
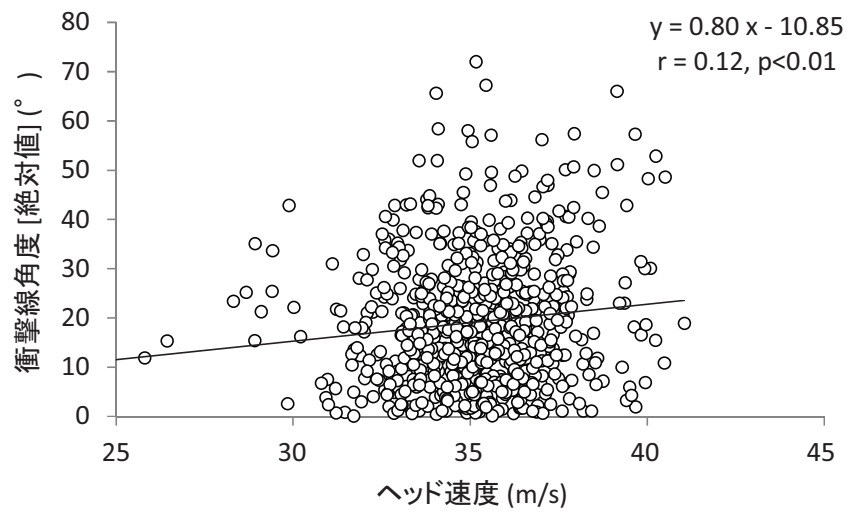


図 5-6 ヘッド速度に対する衝撃線角度と芯からの距離

1.5 V : 打ち分けのメカニズムについて

4章では、バットの打撃面を打球方向とは反対側に向けてインパクトしても流し打ちが可能であることが示された。なお、これらの結果は打球飛距離 40m 以上の試技に限定され、加えて被験者には流し打ちを狙って打たせているため、データには制約がある。また、得られた知見が引っ張りを含めた全ての打球方向に対して応用できるとは限らないが、理論上はバットヘッドを下向きに傾斜させ、ボールをバットの下部へ衝突させることによって、打球をレフト方向へのゴロとして放つことが可能と考えられる (図 5-7)。そこで、流し打ちのインパクトメカニズムが引っ張りやセンター返しにおいても応用可能かどうかを含め、一般化できるかどうかを上記と同様のデータセット (プロ・社会人選手) を用いて検証した。被験者には打球方向の指示を与えず、投球に対して各選手の意識のもと打撃させている。なお、4章では流し打ちであったかどうかを打球の落下地点から定義しているが、プロ・社会人のデータでは打球方向 (引っ張り・センター返し・流し打ち) をインパクト直後の打球の飛翔軌道から決定しているため、打球の回転によって軌道が左右方向へどれだけ逸れたかという点については考慮されていない。

その上で、インパクト時のバットの方位を示す球面プロットを用いて大学生選手 (図 4-1-5) とプロ社会人選手 (図 5-8) を比較しても、プロットの分布に関する傾向は類似しており、バットの打撃面をレフト側へ向けたインパクトも多くみられた。次に、打球方向間で比較すると、流し打ちからセンター返し、引っ張りへと移行するにつれてプロットの分布は引っ張り方向へとシフトしていったものの、ゴロの打撃は各打球方向内のライナー・フライに比べてバットの打撃面をライト側へ向けてインパクトを行っていた (図 5-8)。これより、引っ張りのゴロにおいては、推察した通りバットの打撃面をセンターからややライト側へ向けたインパクトを行っていたが、その数は少なかった。理由の一つには、この位置でインパクトを行った場合、衝撃線角度のコントロールを誤った場合には自打球となる恐れがあるため、このようなインパクトを避けていることが考えられる。以上より、

左右方向への打ち分けは，流し打ちだけでなく，引っ張りやセンター返しにおいても2つのインパクトメカニズムを併用していた．以上より，大学生を対象として得られた本研究の知見は，熟練した全ての野球選手に対して一般化できるといえる．

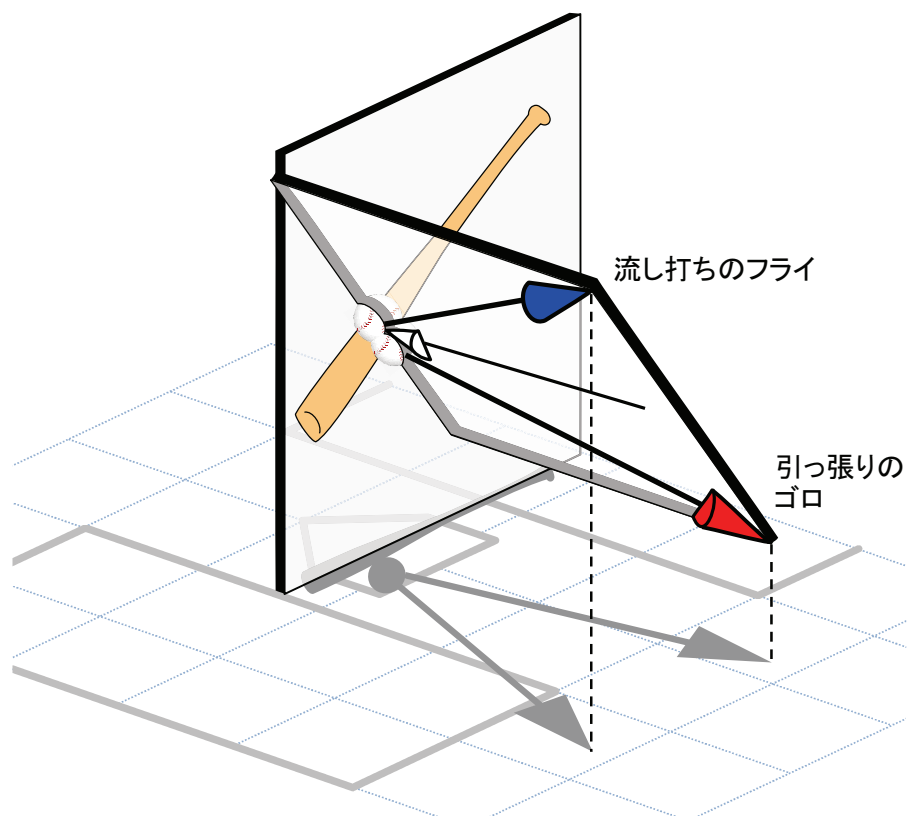


図 5-7 バットヘッドの下向き傾斜と衝撃線角度の相互作用によって流し打ちと引っ張りを可能にするインパクトモデル．これにより，理論上はバットの打撃面をライト側へ向けたインパクトであっても，レフト方向へゴロを放つことが可能となる．

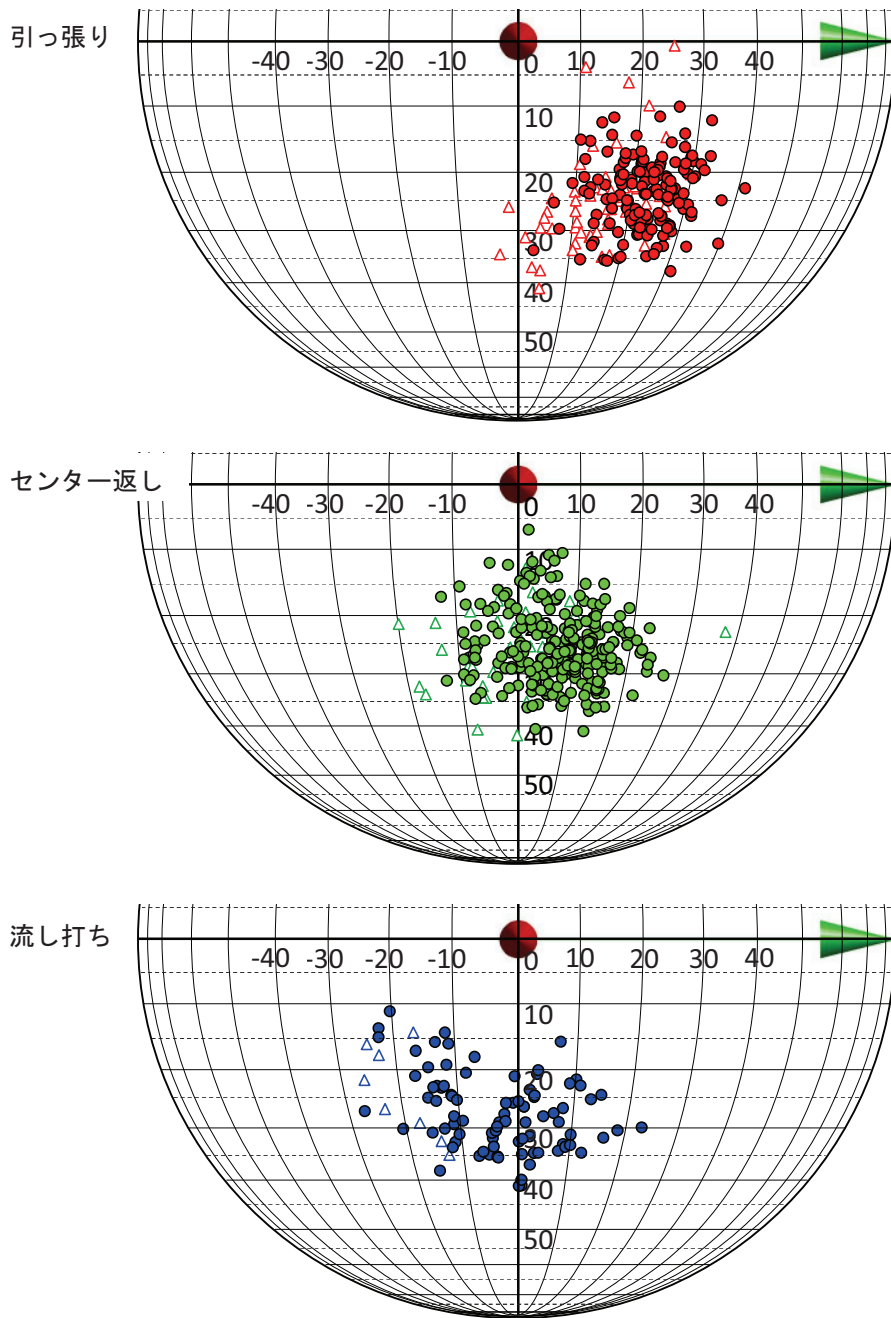


図 5-8 球面上にプロットしたインパクト時のバットヘッドの 3 次元方位. 球の経度は水平バット角であり, プラスであればバットの打撃面がレフト側へ向いたインパクトを示す. 緯度は鉛直バット角であり, プラスであればバットヘッドが下向きに傾斜していたことを示している. また, 球の中心は常にグリップエンドとなり, 各プロットの●がライナー・フライ(上向きの打球), △がゴロ(下向きの打球)を示す.

2. 現場への応用

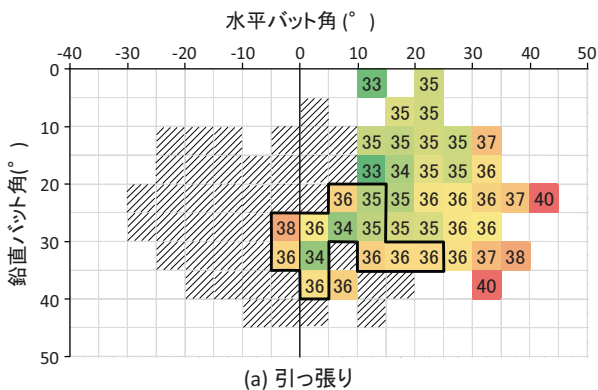
本研究結果は、どのように野球の現場へ活かされるのだろうか？この疑問を解決するために、引っ張り・センター返し・流し打ちそれぞれの方向へ、速度の大きな打球を放つための方策を考えていく。まず、打球方向別のインパクト特性を、上記と同様のデータセット（プロ・社会人選手）を用いて検証した。フェアグラウンドに放たれた試技、かつ明らかに失敗したスイングを除くためにヘッド速度 30m/s 以上、かつ打球速度 25m/s 以上の試技を成功試技として抽出した。これらのデータを、インパクト時の水平面上におけるバットの方位（水平バット角）と、鉛直面上のバットの方位（鉛直バット角）によって構成されるデータとして、 5° 毎に区切られた 2 次元平面上にプロットした。なお、水平バット角と鉛直バット角は、本質的には球座標系上の方位角と仰俯角によって表される球面上にプロットされるべきだが、本研究では便宜的に 2 次元平面上にプロットしており、各領域の面積は一定ではない。その上で、フェアグラウンドを 30° 区切りに「引っ張り」「センター返し」「流し打ち」の 3 方向に分類し、それぞれ打球方向毎に 5° 四方の領域内におけるヘッド速度と打球速度の平均値を各領域の代表値として示した。

打球方向別の各領域におけるヘッド速度と打球速度の平均値を図 5-9 に示す。まず、打球方向別の打ち分け可能なインパクトエリア（数値が書き込まれた領域）に着目すると、引っ張り (a) では、観察された 41 の領域のうち、バットの打撃面をライト側へ向けてインパクトしていたのは 2 領域のみであり、多くが打撃面を 10° 以上レフト側に向けたインパクトであった。センター返し (b) では、観察された全 82 の領域のうち、最も多い 48 領域でインパクトを行っていた。この結果は、インパクト時のバットの方位という観点では、センター返しが最も許容範囲の広い動作であることを示している。流し打ち (c) では、41 の領域でインパクトしており、領域の数では引っ張りと同しかったものの、引っ張りとは異なってバットの打撃面をレフト側へ向けたインパクト（バットの打撃面と打球方向が異なるインパクト）も多くみられた。また、水平バット角の範囲 (55° : $-30 \sim 25^\circ$) も、

引っ張り (50° : $-5\sim 45^\circ$) に比べて 5° 大きかった。また、図中の黒色で囲われた 12 の領域では、フェアグラウンド内の全ての方向に打球が放たれていた。すなわちこの結果は、この領域内で行ったインパクトでは、ボールの上部を打撃するか、あるいは下部を打撃するかといった衝撃線角度の調節によって打球が 3 方向全てに放たれていたことを示している。

次に、インパクト時のバット角度と速度の関係を観察すると、被験者によってヘッド速度の最大値が異なるため一概にはいえないものの、ヘッド速度が大きかったインパクトは、打ち分け可能なインパクトエリアの中でも比較的投手側 (水平バット角 $> 0^\circ$) でみられた (図 5-9, a, b, c)。この結果は、打球の方向にかかわらず、水平バット角の大きなインパクトほど、バットヘッドの加速期間が長くなったために、結果的にインパクト時のヘッド速度が大きくなったと推察される。一方で、全ての打球方向について、各領域におけるヘッド速度と打球速度の間には、有意な相関関係がみられなかった (引 : $r = 0.13, p > 0.4$, セ : $r = 0.22, p > 0.1$, 流 : $r = -0.19, p > 0.2$)。すなわちこの結果は、ヘッド速度の大きなインパクトが必ずしも大きな打球速度には結びついていないことを示している。その上で、打球速度が大きかったポイントは、引っ張り (d) からセンター返し (e)、流し打ち (f) へと変化するにつれて、それぞれの打ち分け可能なインパクトエリア内で投手側から捕手側へとシフトしていく傾向がみられた。

• ヘッド速度 (m/s)



• 打球速度 (m/s)

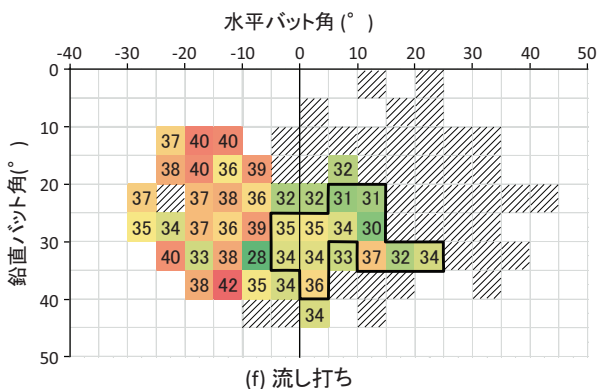
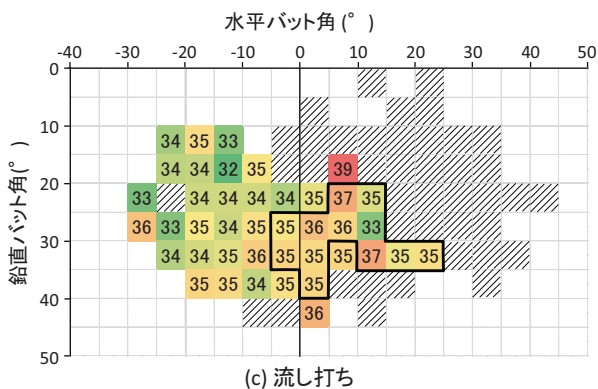
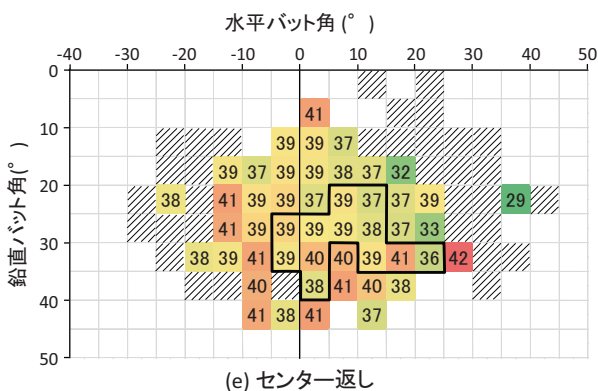
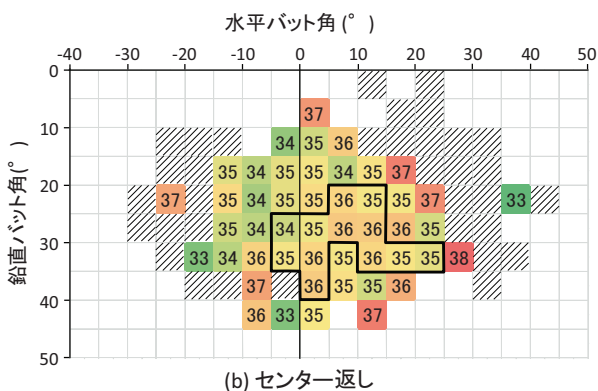
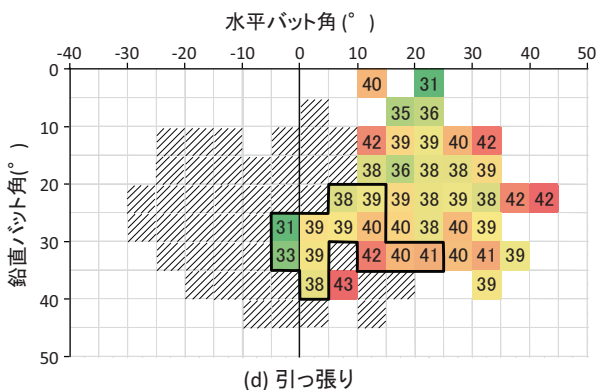


図 5-9 5° 毎にバット角を区切った際のヘッド速度 (a, b, c) と打球速度 (d, e, f) の平均値. 図中の太線で囲われた 12 の領域では, 3 方向全てに打球が放たれていた.

それぞれの打ち分けについて、より投手側で行ったインパクトほど打球は上方向に放たれ (図 5-9, a, b, c), 衝撃線角度 10° 前後のインパクトによって速度が最大となった (図 5-11). この角度から外れた斜め衝突となるインパクトほど打球速度が小さくなるため、特にセンター返しや流し打ちに関しては、大きなヘッド速度を獲得できるような投手側でのインパクトであっても、結果的に速度の小さな打球がフライとなって放たれたものと考えられる. また、水平バット角とアップースイングであったかダウンスイングであったかを示すスイング角との関連をみると、バットの打撃面をよりレフト側に向けたインパクトほどアップースイングによるインパクトを行っていた (図 5-12). すなわちこの結果は、バットヘッドを投手側へ向けたインパクトであっても速度の大きな打球が観察された引っ張りは、衝撃線角度が大きなインパクトでも、その分大きなアップースイングでインパクトすることで、衝撃線とスイング軌道が一致するようなより正面衝突に近いインパクトを可能にしていたものと考えられる.

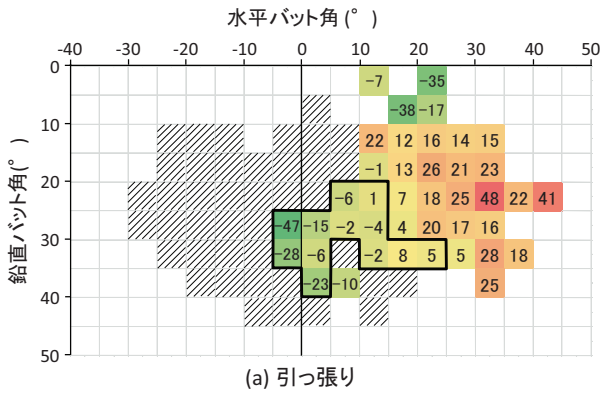
さらに、それぞれの方向への打ち分けについて、各領域の打球の左右角を分析したところ、引っ張り (d) とセンター返し (e) については、水平バット角の大きなインパクトほど打球の左右角が小さくなる傾向がみられたが、流し打ち (f) については両者の間に関連はみられなかった. すなわち、引っ張りやセンター返しを狙った方向へ打ち返すためには、水平バット角のコントロールが最も重要である. これに対し、流し打ちでは水平バット角だけでなく、鉛直バット角と衝撃線角度の相互作用のコントロールが重要といえる.

以上より、左右への打ち分けにおいて、ヘッド速度と打球速度を高めるための方策は一致しておらず、それぞれの変数が最大化されるおおよそのバット角度が存在することが示唆された. 従って、打者には自身の目的に応じて打撃ポイントを調節することが求められる.

なお、鉛直バット角はインパクトポイントの高さと関連がみられ (図 5-13), 低めの打球コースほどバットヘッドを下向きに傾斜させてインパクトを行っていた. この結果をス

イングのタイミングに起因する水平バット角と併せることで、投手目線で打ち分けさせないための方策がみえてくる。まず、打者に引っ張りを行わせないようにするには、タイミングを遅らせるような投球が最も重要であり、高めほど有効と考えられる。センター返しはインパクトエリアが最も広く、極端にタイミングを遅らせるか早めさせること以外、打たせないようにすることは難しいものと推察される。流し打ちについては、真ん中から低めのコースで打ち分け可能なインパクトエリアが広がっているため、高めのコースでタイミングを早めさせるような投球が最も有効と考えられる。しかしながら、これらの考察は他の打球方向を考慮していないため、当該方向へ打たせなくとも他の方向に痛打される可能性があることから注意が必要である。

• 打球上下角 (°)



• 打球左右角 (°)

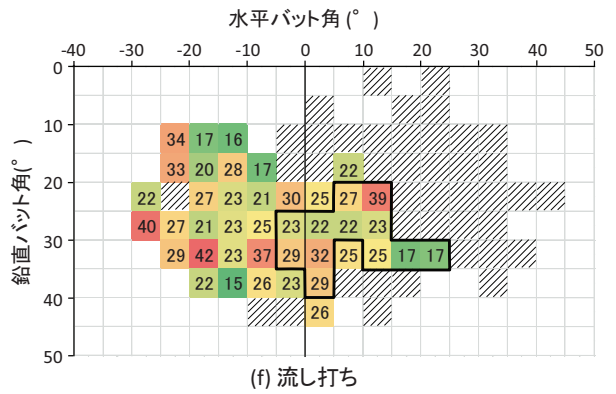
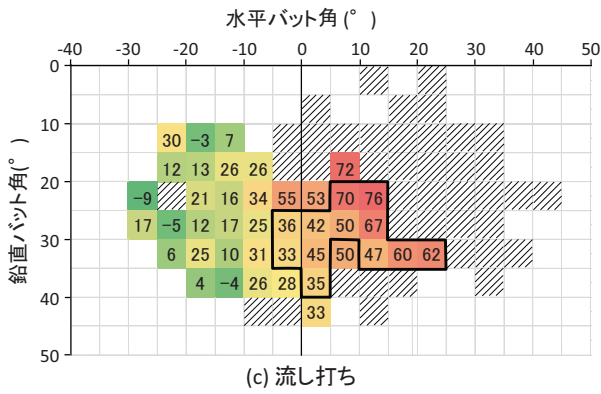
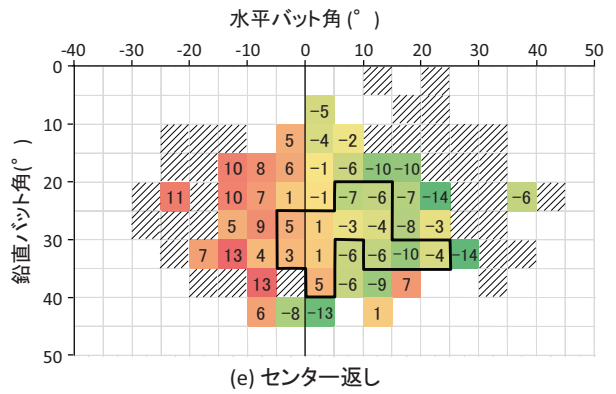
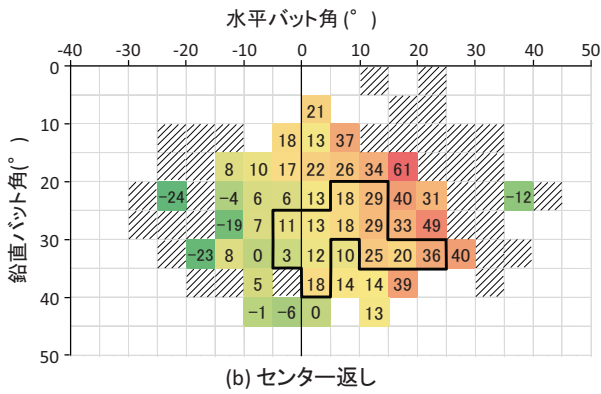
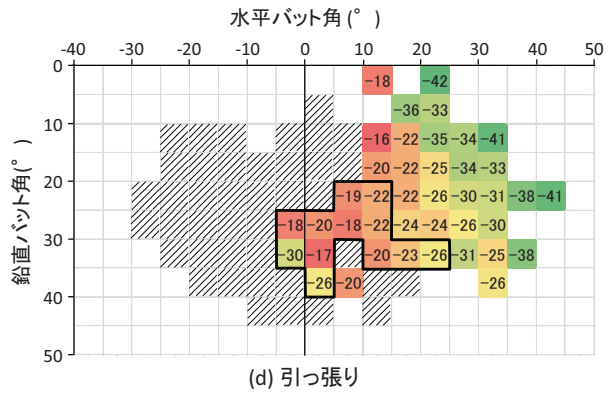


図 5-10 5° 毎にバット角を区切った際の打球の上下角 (a, b, c) と左右角 (d, e, f) の平均値. 打球の左右角は, センターラインを 0° とし, プラスがライト(流し打ち)方向, マイナスがレフト(引っぱり)方向である. 図中の太線で囲われた 12 の領域では, 3 方向全て打球が放たれていた.

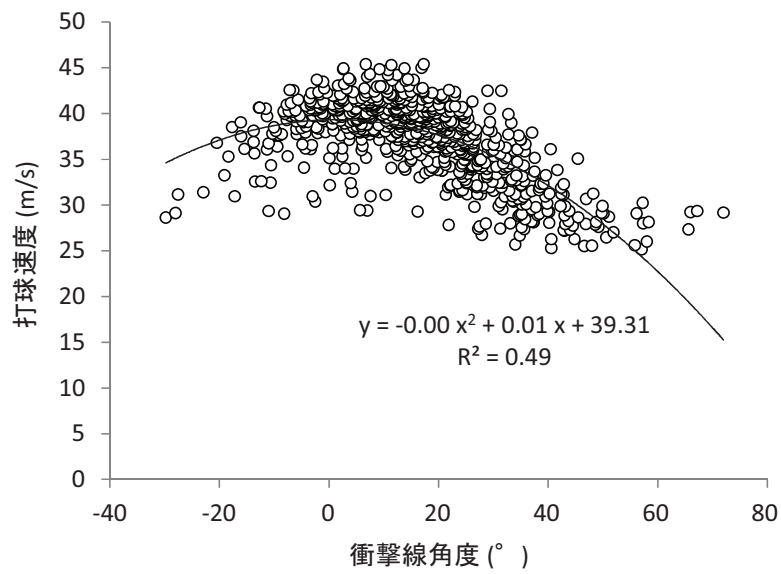


図 5-11 衝撃線角度と打球速度の関係

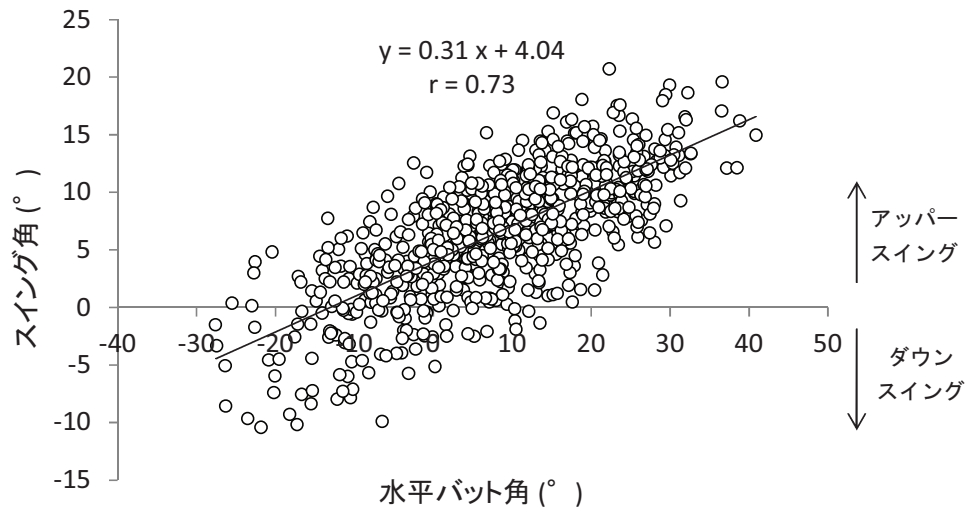


図 5-12 水平バット角とスイング角の関係

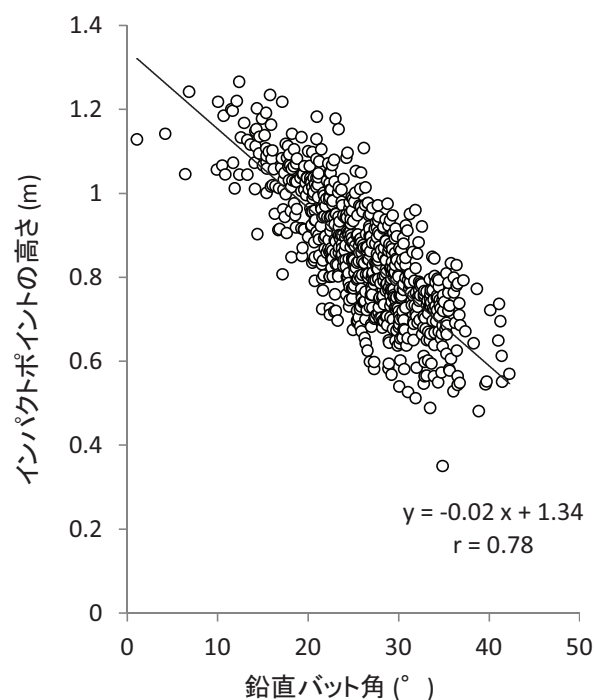


図 5-13 鉛直バット角とインパクトポイントの高さとの関係

最後に、打球方向別にみたヘッド速度と打球速度の関係を、累積確率分布(生存率曲線)を用いて比較した(図 5-14)。この図の縦軸は、横軸で記録した値以上の試技が全試技の何%であったかを示しており、50%であれば各方向における全試技の半分が、折れ線グラフにおける当該速度を上回っていたことを示す。ヘッド速度・打球速度それぞれについて、打球方向間で生存率曲線に差があるかどうかを Log-rank Test を用いて検定した。その結果、ヘッド速度については引っぱりと流し打ちの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、打球速度については全ての打球方向間に有意差が認められた(引 vs セ : $p < 0.05$, 引 vs 流 : $p < 0.01$, セ vs 流 : $p < 0.01$)。一方で、流し打ちの打球速度は、引っぱりやセンター返しの打球速度とは異なり、生存率が直線的に減少していった。このため、36m/s の打球速度に着目すると、引っぱりとセンター返しでは 80%前後の試技でこの値を上回っていたが、流

し打ちでは半分の 40%程度となった。このように、ヘッド速度については打球方向間で大きな差がみられなかったものの、打球速度については流し打ちが引っ張りやセンター返しよりも大幅に下回っていた。この結果の原因について検討するために、それぞれの打球方向について、正面衝突によるインパクトがどの程度行われていたのかを調査した。図 5-1 のように、衝撃線とスイング軌道の差【衝撃線角度－スイング角】を打球方向毎に算出したところ、引っ張りでは $-1.0 \pm 12.5^\circ$ ，センター返しでは $8.4 \pm 10.0^\circ$ ，流し打ちでは $19.3 \pm 8.5^\circ$ となった。これを、打球方向間で一元配置の分散分析を用いて検定したところ、全打球方向間で有意差が認められた ($p < 0.01$)。すなわち、引っ張りやセンター返しでは比較的正面衝突に近いインパクトを行っていたのに対し、流し打ちではバットのスイング軌道よりもやや上部にボールが衝突しており、このインパクト特性の差によって打球速度に差が生じたものと考えられる。以上のことから、バットの打撃面をライト側に向けたインパクトほどダウンスイングとなっていた(図 5-12) 結果と併せて、同じ速度によるスイングであっても流し打ちでは、正面衝突によるインパクトを行わせることが困難になるために、結果として他の打撃よりも打球速度が低下していたと考えられる。ゆえに、流し打ちが難しいとされる要因の一端には、正面衝突を行うことの難しさがあるのではないかと考えられる。従って、流し打ちで痛烈な打球を放つためには、バットスイングの一連の軌道の中で流し打ちを行うのではなく、流し打ち固有のスイングが必要ではないのだろうか。

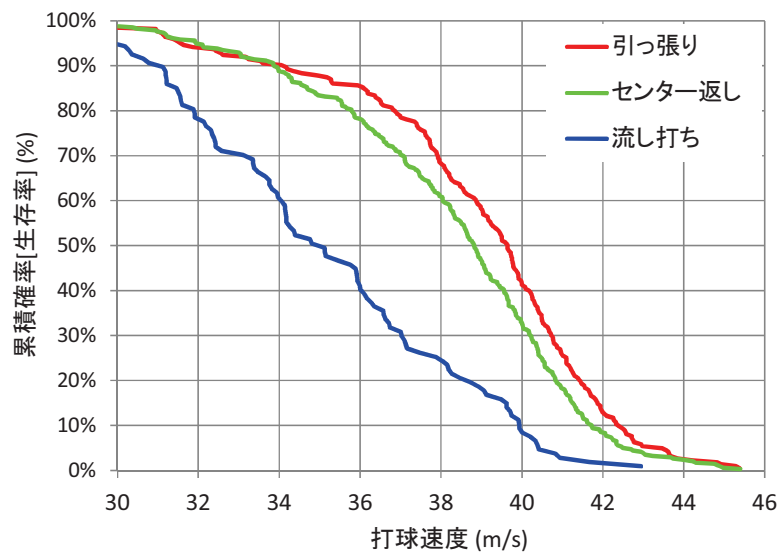
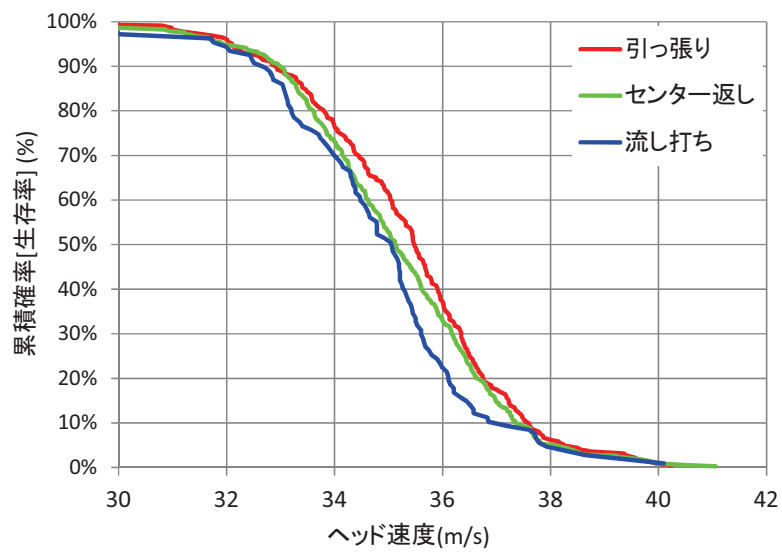


図 5-14 打球方向別にみたヘッド速度と打球速度の累積確率分布（生存率曲線）。縦軸は、横軸で記録した値以上の試技が、方向別の全試技数に対して何%であったのかを示している。

第6章 結論

本学位論文では、『狙った方向に鋭い打球を放つために必要なインパクト技術』をメインのテーマとして研究を行った。その結果、全ての熟練した野球選手に対して、正面衝突に近いインパクトによって低い弾道で打球が放たれた場合に、痛烈な打球となることが明らかとなった。また、その瞬間でみた場合には、ヘッド速度を高めるよりも、バットの芯付近でボールの中心をインパクトすることの方が、痛烈な打球を放つためには重要であることが示された。さらに、左右方向への打ち分けについて、打球の左右角は、インパクト時におけるバットの水平面上の方位（水平角）だけでなく、バットの下向き傾斜（鉛直角）と、バットの短軸方向の衝突角度（衝撃線角度）の相互作用の影響も受けることが明らかとなった。

参考文献

【第 1 章】

- Adair, RK., 2001. Comment on “The sweet spot of a baseball bat,” by Rod Cross. *American Journal of Physics* 69 (2), 229-230.
- Adair, RK., 2002. *The physics of baseball*, 3rd edition. Harper Perennial, -
- Adair, RK., 2005. Comment on “How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories,” by Gregory S. Sawicki, Mont Hubbard, and William J. Stronge. *American Journal of Physics* 73 (2), 184-185.
- Arakawa, K., Mada, T., Komatsu, H., Shimizu, T., Satou, M., Takehara, K., Etoh, G., 2006. Dynamic contact behavior of a golf ball during an oblique impact. *Experimental Mechanics* 46 (6), 691-697.
- Bahill, AT., Karnavas, WJ., 1989. Determining ideal baseball bat weight using muscle force-velocity relationships. *Biological Cybernetics* 62 (2), 89-97.
- Bahill, AT., Freitas, MM., 1995. Two methods for recommending bat weights. *Annals of Biomedical Engineering* 23 (4), 436-444.
- Bahill, AT., 2004. The ideal moment of inertia for a baseball or softball bat. *IEEE Transactions on Systems* 34 (2), 197-204.
- Bahill, AT., Baldwin, DG., 2008. *Mechanics of baseball pitching and batting*, Chapter 16. *Applied Biomedical Engineering Mechanics*, (Ed. Dhanjoo Ghista).
- Barnes, G., 1958a. Study of collisions. Part I. A survey of the periodical literature. *American Journal of Physics* 26 (1), 5-8.
- Barnes, G., 1958b. Study of collisions. Part II. Survey of the textbooks. *American Journal of Physics* 26 (1), 9-12.
- Bayman, BF., 1976. Model of the behavior of solid objects during collision. *American*

- Journal of Physics 44 (7), 671-676
- Briggs, L.J., 1945. Methods for measuring the coefficient of restitution and the spin of a ball. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 34, 1-23.
- Brody, H., 1984. That's how the ball bounces. *The Physics Teacher* 22 (8), 494-497.
- Brody, H., 1986. The sweet spot of a baseball bat. *American Journal of Physics* 54 (7), 640-643.
- Brody, H., 1990. Models of baseball bats. *American Journal of Physics* 58 (8), 756-758.
- Brody, H., 2005. The moment of inertia of a tennis ball. *Physics Teacher* 43, 503-505.
- Bryant, FO., Burkett, LN., Chen, BS., Krahenbuhl, GS., Lu, P., 1977. Dynamic and performance characteristics of baseball bats. *The Research Quarterly* 48 (3), 505-509.
- Burbank, SD., Smith, LV., 2012. Dynamic characterization of rigid foam used in finite element sports ball simulations. *Journal of Sports Engineering and Technology* 226 (2), 77-85.
- Carre, MJ., James, DM., Haake, SJ., 2004. Impact of a non-homogeneous sphere on a rigid surface. *Journal of Mechanical Engineering Science* 218 (3), 273-281.
- Chase, A., Hubbard, M., Ray, C., 2008. How optimal baseball swings change for three levels of play (P103). *The Engineering of Sport* 7 (1), 539-545.
- Crisco, JJ., Hende, SP., Greenwald, RM., 1997. The influence of baseball modulus and mass on head and chest impact: A theoretical study. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29 (1), 26-36.
- Crisco, JJ., Greenwald, RM., Blume JD., Penna, LH., 2002. Batting performance of wood and metal baseball bats. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 34 (10), 1675-1684.

- Cross, R., 1997. The dead spot of a tennis racket. *American Journal of Physics* 65 (8), 754-764
- Cross, R., 1998a. The sweet spot of a baseball bat. *American Journal of Physics* 66 (9), 772-779.
- Cross, R., 1999a. Impact of a ball with a bat or racket. *American Journal of Physics* 67 (8), 692-702.
- Cross, R., 1999b. The bounce of a ball. *American Journal of Physics* 67 (3), 222-227
- Cross, R., 1999c. Dynamic properties of tennis balls. *Sports Engineering* 2 (1), 23-33.
- Cross, R., 2000. The coefficient of restitution for collisions of happy balls, unhappy balls, and tennis balls. *American Journal of Physics* 68 (11), 1025-1031.
- Cross, R., 2001. Response to "Comment on 'The sweet spot of a baseball bat'". *American Journal of Physics* 69 (2), 231-232.
- Cross, R., 2002a. Grip-slip behavior of a bouncing ball. *American Journal of Physics* 70 (11), 1093-1102.
- Cross, R., 2002b. Measurements of the horizontal coefficient of restitution for a superball and tennis ball. *American Journal of Physics* 70 (5), 482-489.
- Cross, R., 2003a. Measurements of the horizontal and vertical speeds of tennis courts. *Sports Engineering* 6 (2), 95-111.
- Cross, R., 2004. Center of percussion of hand-held implements. *American Journal of Physics* 72 (5), 622-630.
- Cross, R., 2005a. A double pendulum swing experiment: In search of a better bat. *American Journal of Physics* 73 (4), 330-339.
- Cross, R., 2005b. Bounce of a spinning ball near normal incidence. *American Journal of Physics* 73 (11), 914-920.

- Cross, R., 2010b. Impact of a ball on a surface with tangential compliance. *American Journal of Physics* 78 (7), 716-720.
- Cross, R., Bower, R., 2006. Effects of swing-weight on swing speed and racket power. *Journal of Sports Sciences* 24 (1), 23-30.
- Cross, R., Nathan, AM., 2006. Scattering of a baseball by a bat. *American Journal of Physics* 74 (10), 896-904
- Cross, R., 2008. Differences between bouncing balls, springs, and rods. *American Journal of Physics* 76 (10), 908-915.
- Cross, R., 2009. Mechanics of swinging a bat. *American Journal of Physics* 77 (1), 36-43
- Cross, R., Nathan, AM., 2009. Performance versus moment of inertia of sporting implements. *Sports Technology* 2 (1-2), 7-15.
- Cross, R., 2011. *Physics of Baseball and Softball*. Springer
- Cross, R., 2013. Impact of sports balls with striking implements. *Sports Engineering*,
- Drane, PJ., Sherwood, JA., 2004. Characterization of the effect of temperature on baseball COR performance. *The Engineering of Sport* 5, 59-65.
- Fleisig, GS., Zheng, N., Stodden, DF., Andrews, JR., 2002. Relationship between bat mass properties and bat velocity. *Sports Engineering* 5 (1), 1-8.
- Garwin, RL., 1969. Kinematics of an ultraelastic rough ball. *American Journal of Physics* 37 (1), 88-92.
- Goldsmith, W., 2001. *Impact: the theory and physical behavior of colliding solids*. Dover Publications, Inc, Mineola, New York,
- Goodwill, SR., Haake, SJ., 2004. Ball spin generation for oblique impacts with a tennis racket. *Experimental Mechanics* 44 (2), 195-206.
- Greenwald, RM., Penna, LH., Crisco, JJ., 2001. Differences in batted ball speed with

- wood and aluminum baseball bats: a batting cage study. *Journal of Applied Biomechanics* 17 (3), 241-252.
- Gugan, D., 2000. Inelastic collision and the Hertz theory of impact. *American Journal of Physics* 68 (10) 920-924.
- Hendee, SP., Greenwald, RM., Crisco, JJ., 1998. Static and dynamic properties of various baseball. *Journal of Applied Biomechanics* 14 (4), 390-400.
- Hester, L., Koenig, K., 1993. Performance measurements of baseball bats. *Journal of the Mississippi Academy of Science* 38, 7-10.
- Hubbard, M., Stronge, WJ., 2001. Bounce of hollow balls on flat surface. *Sports Engineering* 4 (2), 49-61.
- Janda, DH., Viano, DC., Andrzejak, DV., Hensing, RN., 1992. An analysis of preventative methods of baseball induced chest impact injuries. *Clinical Journal of Sports Medicine* 2, 172-192.
- Kagan, DT., 1990. The effects of coefficient of restitution variations on long fly balls. *American Journal of physics* 58 (2), 151-154.
- Kagan, D. Atkinson, D., 2004. The coefficient of restitution of baseballs as a function of relative humidity. *The physics teacher* 42 (6), 89-92.
- Kensrud, JR., Smith, LV., 2013. Spin from oblique impact of batted sports balls. *Procedia Engineering* 60, 130-135.
- Kirkpatrick, P., 1963. Batting the ball. *American Journal of Physics* 31 (8), 606-613.
- Koenig, K., Mitchell, ND., Hannigan, TE., Clutter, JK., 2004. The influence of moment of inertia on baseball/softball bat swing speed. *Sports Engineering* 7 (2), 105-117.
- Kotze, J., Mitchell, SR., Rothberg, SJ., 2000. The role of the racket in high speed tennis serve. *Sports Engineering* 3 (2), 67-84.

- Leroy, B., 1985. Collision between two balls accompanied by deformation: A qualitative approach to Hertz's theory. *American Journal of Physics* 53 (4), 346-349.
- Lewis, AD., Rogers, RJ., 1988. Experimental and numerical study of forces during oblique impact. *Journal of Sound and Vibration* 125 (3), 403-412.
- Maw, N., Barber, JR., Fawcett, JN., 1976. The oblique impact of elastic spheres. *Wear* 38 (1), 101-114.
- Maw, N., Barber, JR., Fawcett, JN., 1981. The role of elastic tangential compliance in oblique impact. *Journal of Lubrication Technology* 103, 74-80.
- McBeath, MK., Nathan, AM., Bahill, AT., Baldwin, DG., 2008. Paradoxical pop-ups: Why are they difficult to catch? *American Journal of Physics* 76 (8), 723-729
- Mcdowell, M., 2004. Assessment of softball bat safety performance using mid-compression polyurethane softballs. *Sports Biomechanics* 3 (2), 185-194.
- Mcdowell, M., Ciocco, MV., 2006. A pitcher injury risk assessment study analyzing composite, titanium, aluminum and wood softball bat performance. *European Journal of Sport Science* 6 (3), 155-162.
- Mcintyre, DR., 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.
- Naruo, T., Sato, F., 1998. An experimental study of baseball bat performance. *Engineering of Sport – Design and Development*, 46-51.
- Nathan, AM., 2000. Dynamics of the baseball-bat collision. *American Journal of Physics* 68 (1), 979-990.
- Nathan, AM., 2003. Characterizing the performance of baseball bats. *American Journal of Physics* 71 (2), 134-143.

- Nathan, AM, Russell, DA., Smith, LV., 2004. The physics of the trampoline effect in baseball and softball bats. *The Engineering of Sport* 5, 38-44.
- Nathan, AM., Crisco, JJ., Greenwald, RM., Russell, DA., Smith, LV., 2011a. A comparative study of baseball bat performance. *Sports Engineering* 13 (4), 153-162.
- Nathan, AM., Smith, LV., Faber, WL., Russell, DA., 2011b. Corked bats, juiced balls, and humidors: the physics of cheating in baseball. *American Journal of Physics* 79 (6), 575-580.
- Nathan, AM., Smith, LV., Faber, WL., 2012a. Reducing the effect of the ball on bat performance measurements. *Sports Technology* 4 (1-2), 13-18.
- Nathan, AM., 2012. What new technologies are teaching us about the game of baseball. *Proceedings of the Euromech Physics of Sports Conference*
- Nicholls, RL., Elliott, BC., Miller, K., Koh, Michael., 2003. Bat kinematics in baseball: Implications for ball exit velocity and player safety. *Journal of Applied Biomechanics* 19 (4), 283-294.
- Nicholls, RL., Elliott, BC., Miller, K., 2004. Impact injuries in baseball. *Sports Medicine* 34 (1), 17-25.
- Nicholls, RL., Miller, K., Elliott, BC., 2005a. A numerical model for risk of ball-impact injury to baseball pitchers. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 37 (1), 30-38.
- Nicholls, RL., Miller, K., Elliott, BC., 2005b. Modeling deformation behavior of the baseball. *Journal of Applied Physics* 21 (1), 18-30.
- Nicholls, RL., Miller, K., Elliott, BC., 2006. Numerical analysis of maximal bat performance in baseball. *Journal of Biomechanics* 39 (6). 1001-1009.
- Noble, L., Eck, J., 1986. Effects of selected softball bat loading strategies on impact

- reaction impulse. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 18, 50-59.
- Noble, L., Walker, H., 1994. Baseball bat inertial and vibrational characteristics and discomfort following ball-bat impacts. *Journal of Applied Biomechanics* 10 (2), 132-144.
- Ravindra, NM., Padron, I., Singh, P., Bhatt, B., Singh, V., 2012. Design implementation of baseball bats: reinforced bats – a case study. *JOM* 64 (3), 359-363.
- Rezaei, A., Verhelst, R., Paepegem, WV., Degrieck, J., 2011. Finite element modeling and experimental study of oblique soccer ball bounce. *Journal of Sports Science* 29 (11), 1201-1213.
- Russell, DA., 2004. Hoop frequency as a predictor of performance for softball bats. *The Engineering of Sport* 5, 641-647.
- Sawicki, GS., Hubbard, M., 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.
- Sawicki, GS., Hubbard, M., Stronge, WJ., 2005. Reply to comment on “How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories,” by Gregory S. Sawicki, Mont Hubbard, and William J. Stronge. *American Journal of Physics* 73 (2), 185-189.
- Shenoy, MM., Smith, LV., Axtell, JT., 2001. Performance assessment of wood, metal and composite baseball bats. *Composite Structure* 52 (3-4), 397-404.
- Smith, CE., 1991. Predicting rebounds using rigid-body dynamics. *Journal of Applied Mechanics* 58 (3), 754-758.
- Smith, LV., 2001. Evaluating baseball bat performance. *Sports Engineering* 4 (4), 205-214.

- Smith, LV., Broker, J., Nathan, AM., 2003. A study of softball player swing speed. *Sports Dynamics Discovery and Application*, 12-17.
- Smith, LV., Axtell, JT., 2003. Mechanical testing of baseball bats. *Journal of Testing and Evaluation* 31 (3), 210-214.
- Smith, LV., 2008. Progress in measuring the performance of baseball and softball bats. *Sports Technology* 1 (6), 291-299.
- Smith, LV., Duris, JG., 2009. Progress and challenges in numerically modeling solid sports balls with application to softballs. *Journal of Sports Sciences* 27 (4), 353-360.
- Smith, LV., Nathan, AM., Duris, JG., 2010. A determination of the dynamic response of softballs. *Sports Engineering* 12 (4), 163-169.
- Smith, LV., Kensrud, J., 2013. Field and laboratory measurements of softball player swing speed and bat performance. *Sports Engineering* 34, 538-543.
- Smith, LV., 2013. Hygrothermal effects of baseballs and softballs. *Sports Engineering*,
- Stronge, WJ., 2000. *Impact mechanics*. Cambridge University Press,
- Stronge, WJ., Ashcroft, ADC., 2007. Oblique impact of inflated balls at large deflections. *International Journal of Impact Engineering* 34 (6), 1003-1019.
- Sutton, AD., Sherwood, JA., 2010. Using vibrational analysis to investigate the batted-ball performance of baseball bats. *Procedia Engineering* 2 (2), 2687-2692.
- Tait PG., Steele, WJ., 1865. *A treatise on the dynamics of a particle*, 2nd edition. Macmillan, London.
- Van Zandt, LL., 1992. The dynamical theory of a baseball bat. *American Journal of Physics* 60 (2), 172-181.
- Viano, DC., McCleary, JD., Andrzejak, DV., Janda, DH., 1993. Analysis and comparison

- of head impacts using baseballs of various hardness and a hybrid III dummy. *Clinical Journal of Sports Medicine* 3, 217-228.
- Watts, RG., Baroni, S., 1989. Baseball-bat collisions and the resulting trajectories of spinning balls. *American Journal of Physics* 57 (1), 40-45
- Weyrich, AS., Messier, SP., Ruhmann, BS., Berry, MJ., 1989. Effects of bat composition, grip firmness, and impact location on postimpact ball velocity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 21 (2), 199-205.
- Williams, T., Underwood, J., 1986. *The science of hitting*. Simon and Schuster, New York,
- Watts, RG., Bahill, AT., 2000. *Keep your eye on the ball: curve balls, knuckleballs, and fallacies of baseball*. W. H. Freeman,

【第 2 章】

- Adair RK (2002) : *The physics of baseball*, 3rd edition. HarperCollins, New York : 16-22
- Brody H (1986) : The sweet spot of a baseball bat. *American Journal of Physics* 54 (7) : 640-643
- Cross R (1998) : The sweet spot of a baseball bat. *American Journal of Physics* 66 (9) : 772-779
- Cross R (2004) : Center of percussion of hand-held implements. *American Journal of Physics* 72 (5) : 622-630
- Nathan AM (2000) : Dynamics of the baseball-bat collision. *American Journal of Physics* 68 (11) : 979-990
- Nathan AM (2003) : Characterizing the performance of baseball bats. *American Journal of Physics* 71 (2) : 134-143

- Nathan AM (2008) : The effect of spin on the flight of a baseball. American Journal of Physics 76 (2) : 119-124
- Sawicki GS, Hubbard M, 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
- Van Zandt L. L. (1992) : The dynamical theory of the baseball bat. American Journal of Physics 60 (2) : 172-181
- Vedula G and Sherwood JA (2004) : An experimental and finite element study of the relationship amongst the sweet spot, COP and vibration nodes in baseball bats. Proceedings of the 5th Conference of Engineering of Sport, Hubbard M, Mehta RD, Pallis JM (Eds.), International Sports Engineering Association ISEA (2) : 626-632
- Watts RG and Baroni S (1989) : Baseball-bat collisions and the resulting trajectories of spinning balls. American Journal of Physics 57 (1) : 40-45
- Winter DA (1990) : Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & Sons : 41-43

【第 3 章】

- Brody H (1986) : The sweet spot of a baseball bat. American Journal of Physics 54 (7) : 640-643
- Crisco JJ, Greenwald RM, Blume JD, Penna LH (2002) : Batting performance of wood and metal baseball bats. Medicine & Science in sports & Exercise : 1675-1684
- Cross R (1998) : The sweet spot of a baseball bat. American Journal of Physics 66 (9) : 772-779

- Cross R (2001) : Response to “Comment on ‘The sweet spot of a baseball bat’”.
- American Journal of Physics 69 (2) : 229-230
- Cross R (2004) : Center of percussion of hand-held implements. American Journal of Physics 72 (5) : 622-630
- 平野裕一 (1984) : バットによる打の動作. Japanese Journal of Sports Science 3 (3) : 199-208
- 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
- McIntyre DR and Pfautsch EW (1982) : A kinematic analysis of the baseball batting swing involved in opposite-field and same-field hitting. Research Quarterly for Exercise and Sport 53 : 206-213
- 森下義隆, 那須大毅, 神事努, 平野裕一 (2012) : 広角に長打を放つためのバットの動き. バイオメカニクス研究 16(1) : 52-59
- 及川研 (1996) : 野球のバットの軌道およびそれに影響する打撃動作の類型化の試み. スポーツ方法学研究 9 (1) : 127-139
- Sawicki GS, Hubbard M, 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
- Schmidt RA and Lee TD (2005) : Motor control and learning 4th edition. Human Kinetics Publisher : 207-242
- Tabuchi N, Matsuo T, Hashizume K (2007) : Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. Sports biomechanics 6(1) : 17-30

- 高木斗希夫, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良 (2008): 異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌 32 (3): 158-166
- 高木斗希夫, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良 (2010): 無作為投球速度変化状況での野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌 34 (1): 53-62
- Vedula G and Sherwood JA (2004): An experimental and finite element study of the relationship amongst the sweet spot, COP and vibration nodes in baseball bats. Proceedings of the 5th Conference of Engineering of Sport, Hubbard M, Mehta RD, Pallis JM (Eds.), International Sports Engineering Association ISEA (2): 626-632
- Watts RG and Bahill AT (2000): Keep your eye on the ball: Curve balls, knuckle balls, and fallacies of baseball. New York
- Watts RG and Baroni S (1989): Baseball-bat collisions and the resulting trajectories of spinning balls. American Journal of Physics 57 (1): 40-45
- Van Zandt L. L. (1992): The dynamical theory of the baseball bat. American Journal of Physics 60 (2): 172-181

【第4章】

- Mcintyre, DR., 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, 206-213.
- Cross, R., 2005b. Bounce of a spinning ball near normal incidence. American Journal of Physics 73 (11), 914-920.
- Cross, R., Nathan, AM., 2006b. Scattering of a baseball by a bat. American Journal of Physics 74, 896-904
- Watts, RG., Baroni, S., 1989. Baseball-bat collisions and the resulting trajectories of

- spinning balls. *American Journal of Physics* 57, 40-45
- Sawicki, GS., Hubbard, M., Stronge, WJ., 2003. How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories. *American Journal of Physics* 71. 1152-1162.
- Crisco, JJ., Greenwald, RM., Blume JD., Penna, LH., 2002. Batting performance of wood and metal baseball bats. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 34 (10), 1675-1684.
- Fleisig, GS., Zheng, N., Stodden, DF., Andrews, JR., 2002. Relationship between bat mass properties and bat velocity. *Sports Engineering* 5, 1-8.
- Tabuchi, N., Matsuo, T., Hashizume, K., 2007. Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. *Sports Biomechanics* 6, 17-30.
- Nicholls, RL., Elliott, BC., Miller, K., Koh, Michael., 2003. Bat kinematics in baseball: Implications for ball exit velocity and player safety. *Journal of Applied Biomechanics* 19, 283-294.
- King, K., Hough, J., McGinnis, R., 2012. A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. *Sports Engineering* 15, 41-52.
- Müller, H., and Loosch, E., 1999 Functional variability and an equifinal path of movement during targeted throwing. *Journal of Human Movement Studies* 36, 103-126.
- Müller, H., and Sternad, D., 2004 Decomposition of variability in the execution of goal-oriented tasks: Three components of skill improvement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30 (1) 212-233.

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、中京大学に在籍していた当時から熱心なご指導を頂き、今の自分があるのは全て矢内先生のおかげと言っても過言ではありません。本当に感謝しております。

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 川上泰雄教授、彼末一之教授に感謝申し上げます。ミーティングや授業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。

若原卓先生、宮本直和先生、近田彰治先生にも日頃から数々のアドバイスを頂きました。野球研究を一緒に行ってきた永見智行さん、樋口貴俊さん、森下義隆さん、谷中拓哉君には実験実施から分析方法、データの解釈まで大変なご支援を頂きました。

被験者を快く引き受けて頂いた大学・社会人・プロ野球選手の皆様や関係者の方々のおかげで貴重なデータを得ることができました。このデータを少しでも皆様のお役に立てるようなものにすべく、これからも努めてまいります。また、苦楽を共にしてきた同期をはじめとする大学院生の皆様には大変感謝しております。大学院生としてのこの5年間は、忘れることのできない財産となりました。

最後に、私のことを温かく見守り支えてくれた家族のみんなに感謝します。

みなさま、本当にありがとうございました。

2014年1月 城所収二