

2012 年度 修士論文

野球のバントにおける
打球速度を最小化させるインパクトパラメータ

Impact parameters for minimizing batted ball speed
in baseball bunt

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5011A006-5

安藤 義人

Yoshihito ANDO

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第1章 緒言	---1
1.1 序 バントとは	
1.2 研究小史	
1.2.1 バットの芯	
1.2.2 バッティングにおける打球速度とインパクトパラメータ	
1.2.3 芯の定義	
1.2.4 グリップ位置の影響	
1.3 目的・意義	
第2章 実験方法	---12
2.1 被験者	
2.2 実測試技	
2.3 データ収集	
2.4 データ処理	
2.5 統計処理	
第3章 結果・考察	---22
3.1 グリップ位置	
3.2 結果の妥当性、デジタイズの再現性	
3.3 投球コンディション	
3.4 打球速度、バット重心速度、バット角度	
3.5 インパクトパラメータ	
3.6 打球速度とインパクトパラメータ	
3.7 直衝突と斜衝突	
3.8 力積・運動量の法則	
3.9 打球速度とインパクト前のバット重心速度	
3.10 打球速度と長軸方向のインパクト位置	
3.11 バットの仕事	
3.12 バットの振動	
3.12.1 バットの振動実験・目的	
3.12.2 方法	
3.12.3 結果・考察	
3.13 目標設定の限界	
第4章 結論	---49
参考文献	
謝辞	

第 1 章 緒言

1.1 序 バントとは

野球は走者を進塁させることで得点するスポーツである。そのため攻撃における作戦は、走者を進塁させることを目的としたものが主である。中でも、試合で多く用いられる作戦がバントであり、その成否が試合の勝敗に大きな影響を与えると指導書(石井 1984、上平と大貫 1991、黒江 1995)や現場でいわれている。公認野球規則において、バントは『バットをスイングしないで、内野にゆるく転がるように意識的にミートした打球である』と定義されている。しかし、通常は「打球」よりも、このような打球を生み出す「打撃行為」そのものを表すことが多く、本論文では以後、打撃行為をバント、バットとのインパクト後のボールを打球と定義する。バントには犠牲バント、スクイズバント、セーフティバント、ドラッグバント、プッシュバントがある(黒江 1995)。犠牲バントは先述した走者進塁を目的とした作戦行為のことであり、スクイズバントは特に三塁走者がいる時の犠牲バントである。なお、本論文で対象とするバントはスクイズバントを含む犠牲バントとする。

通算犠牲バント数ギネス記録(533 本)保持者の川相昌弘(2011)は著書の中で、バントを成功させるためには 2 種類の考え方があるとしている。それは意図した方向に打球を転がすことと「打球を殺す」ことである。意図した方向に打球を転がすことに関して、来田(2009)はインパクト時のバットの打撃面の向き(水平角)とバントの打球方向の関係を明らかにしている。これはバッティングにおけるインパクト時のバットの水平角と左右への打ち分けの関係(McIntyre & Pfautch 1982)と同様の結果であったとしている。「打球を殺す」とは現場や指導書で多用される表現であり、具体的に言い換えると打球速度を小さくすることである(前田 1998、山本 2000)。これまでバントの打球速度を小さくする要因は明らかとされていない。打者の前方から突進してくる守備側の選手の打球

処理時間を延長させるため、打球速度は小さい方がよいとされている(田尾 1998)。そこで本論文では打球速度を 0 m/s に近づける、つまり打球速度を最小化させることをバントにおける目標と設定した。

バントの打球速度を最小化させるために、現場では「バットの芯を外し、先端(バットヘッド側)でインパクトする」ことが重要だと指導されている(上平と大貫 1991、前田 1998、川相 2011)。この指導は、バッティングにおける経験・知見に基づくと考えられる。しかし、同一競技の打撃行為でありながら、バントとバッティングでは明らかな相違点が多い。バントの目標は打球速度の最小化である一方、バッティングは内野手の間を抜くような打球を放つことや飛距離を大きくすることが重要であり、ひいては打球速度の最大化を目標としている。またインパクト前のバットは、バントの場合はほぼ静止状態であるが、バッティングでは高速度で移動している。さらにバットを支持する両手の位置(グリップ位置)も大きく異なる。バントは通常両手に十分な間隔を開けバットの末端付近(グリップエンド側)と先端から 1/3 付近～中間付近の 2 ヶ所でグリップする(図 1-1)。一方バッティングは両手の間隔を開けることなくバットの末端をグリップする。このように明らかな相違点がありながら、バッティングにおける経験・知見をバントに適応させることには疑問が生じる。



図 1-1 バント(上)とバッティング(下)のグリップ位置

1.2 研究小史

野球の打撃におけるバイオメカニクス研究は、バッティングを想定して行われたものがほとんどであり、バントに関する研究は皆無に等しい。現在行われているバントの指導はバッティングにおける経験・知見を基にしていると考えられるため、バッティングにおける打球速度とインパクトの関係を理解することは重要である。バッティングにおける打球速度の要因は物理的に複雑でありながら、これまで多くのことが明らかとされている。また本論文において、一般にバットの芯と呼ばれる概念を明確に定義しておかなければならない。この点に関しても、興味深い研究が数多く行われてきた。

1.2.1 バットの芯

バットには「芯」または「スイートスポット」と呼ばれるエリアがある。スイートスポットでボールを打った場合、選手はボールから受ける力や衝撃をほとんど感じず、ボールがうまくよく飛ぶ(Cross 2001、浅見 1984)。しかしスイートスポットとは学術的用語ではなく、その解釈は選手によって異なるため、厳密な定義が非常に難しく、現在もさまざまな定義が混在し、統一されていない。打撃中心(撃心)、振動曲げモードの節、運動エネルギーが最も伝達する位置、打球速度が最大となる位置、反発係数が最大となる位置、手に痺れが伝わらない位置、joy spot などがある(Bahill& Baldwin 2008)。

まず撃心について説明する。バットを糸で括り吊るして何も支えがないと仮定できる自由支持条件において、ボールとインパクトした場合、インパクト後のバットは①通常、並進運動と回転運動を伴った一般運動をする。しかし、②インパクト時のボールの作用線がバットの重心を通る場合、インパクト後のバットは回転せずに並進運動する。また③インパクト後にバットが並進運動せず、ある点 A を中心に回転運動のみ行っているとみなすことができるインパクト位

置 B が存在する(図 1-2)。このとき、回転中心 A に対してインパクト位置 B を撃心と呼ぶ。つまり撃心と回転中心は相互に関係を持つ共役点である。すなわちインパクト位置 B に対して、回転中心 A の位置にバットを支持する手が存在するとき、インパクト位置 B は撃心となる。したがって撃心でインパクトした場合、回転中心上に位置した手の動きは 0 となり、手はボールから受ける力を感じない(浅見 1984)。このような理由から、撃心をスイートスポットとみなすことができる。ただし撃心の位置はバットが剛体であるという仮定の下で成立していることに加え、グリップ位置の影響を受けるためそのバット固有の位置ではない。

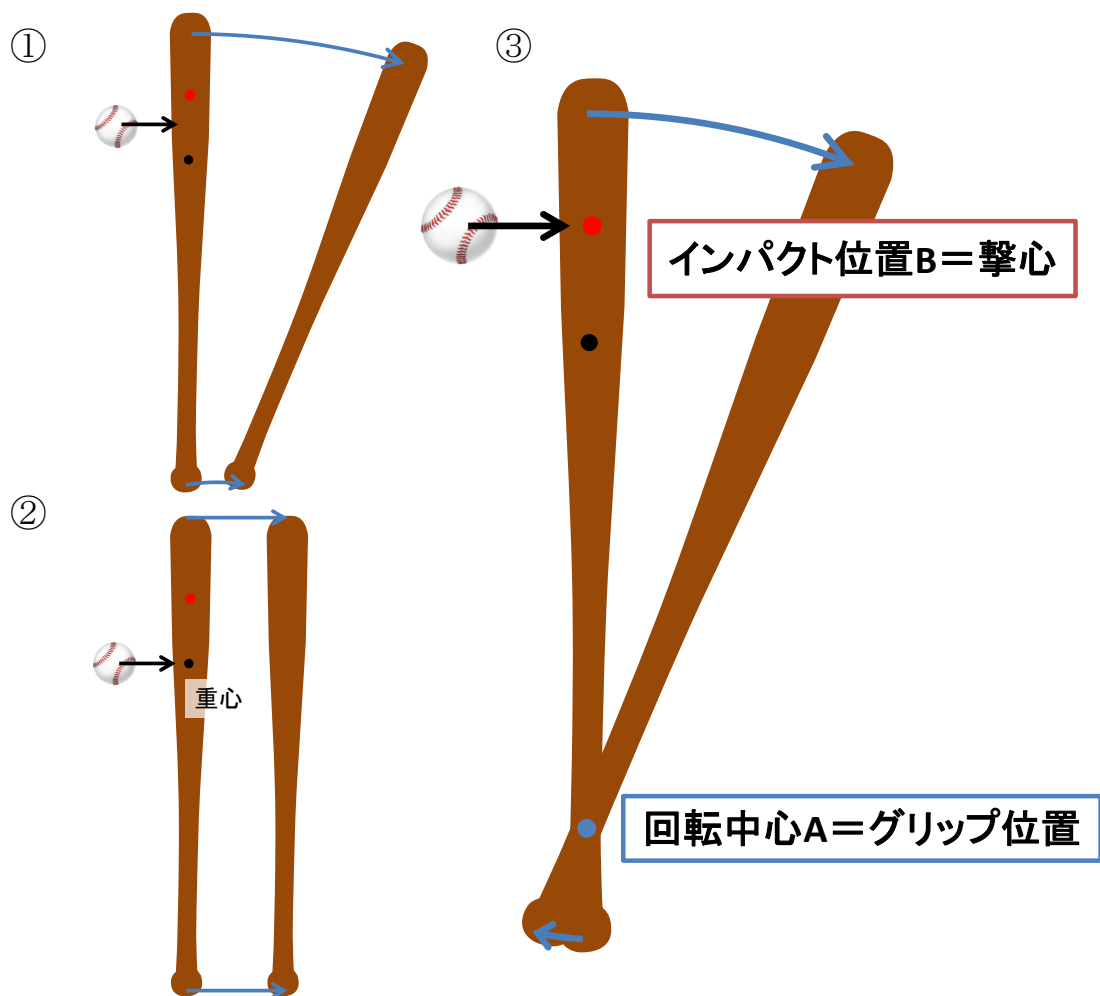


図 1-2 インパクト位置によるバットの挙動の違い

次に振動曲げモードの節である。撃心について説明する際には、バットを剛体とみなした。しかし実際はボールによる衝撃でバットは波を打つように変形・振動する。バットの振動の振幅が 0 の位置である振動曲げモードの節の位置を特定するためモード解析を用いた研究は数多く行われている (Van Zandt1992、Cross1998、Nathan2000、Vedula& Sherwood 2004)。振動曲げモードの節はその物体固有の位置であるが、1 本のバットにつき複数存在する。Cross(1998)は 1 次および 2 次振動モードの節の範囲を **sweet vibration zone**(図 1-3)としており、3 次以上の高次振動モードにおける振幅は 1 次および 2 次振動モードの振幅と比べて十分に小さいため、その影響を無視できるとしている。1 次振動モードの節の位置でインパクトすれば 1 次振動モードは発生しないが、2 次振動モードが発生する。逆もまた然りである。つまりインパクトによりバットの振動を発生させないことは不可能である。しかし、その振動は **sweet vibration zone** におけるインパクトで打者が感じる振動を最小にすることができる。すなわち振動曲げモードの節の位置をスイートスポットとみなすことができる。振動曲げモードの節から離れた位置でインパクトした場合、バットは節の位置でのインパクトに比べて大きく振動する。また、投球の有する運動エネルギーの一部は、インパクトによってバットや手の振動のエネルギーに変換され、この振動のエネルギーは打球の運動エネルギーに再変換されずバットや手の中に消失するため、打球速度が小さくなる (Cross1999、Bahill& Baldwin 2008)。つまり、振動曲げモードの節の位置でインパクトした場合、振動によるエネルギーロスが最小化されるため、打球速度は大きくなる。このような理由からも、振動曲げモードの節をスイートスポットとみなすことができる。

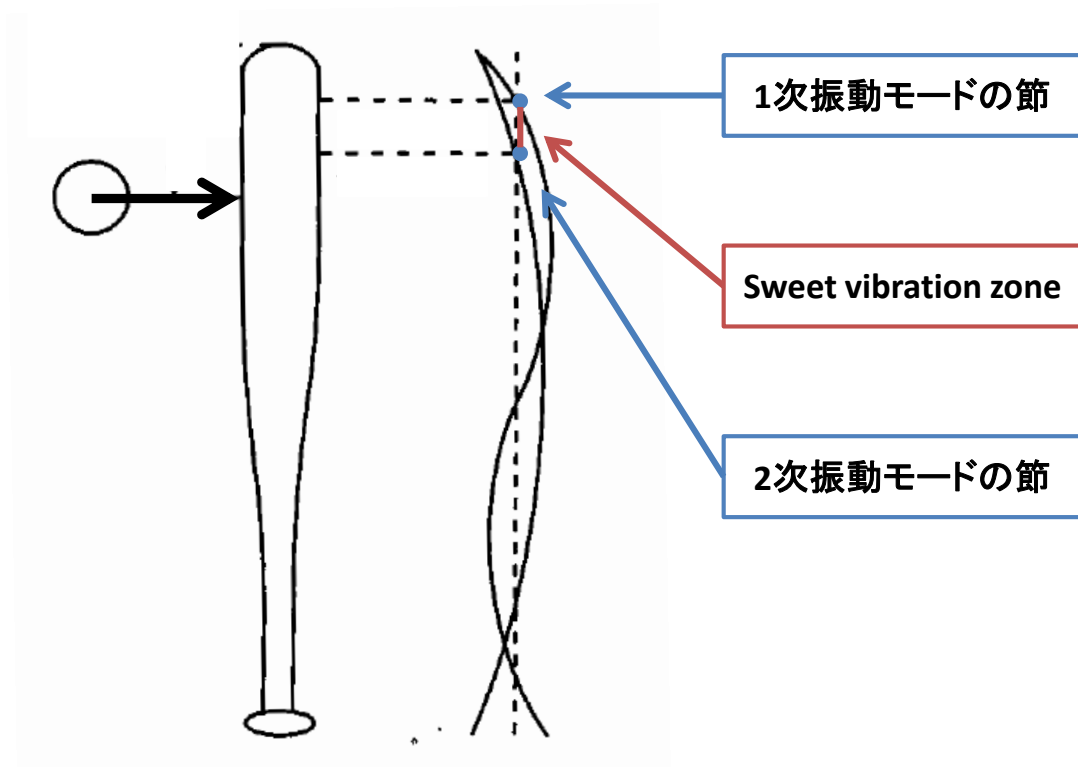


図 1-3 振動曲げモードの節 Cross(1998)より改編

スweetsポットとして挙げられるその他の定義、運動エネルギーが最も伝達する位置、打球速度が最大となる位置、反発係数が最大となる位置は、打球の速度や運動エネルギーなどインパクト中およびインパクト後に得られた結果として定義されるものであり、その要因は撃心や振動曲げモードの節に依存する。また手に痺れが伝わらない位置、joy spot は個人差のある打者自身の感覚を基に定義されている。

1.2.2 バッティングにおける打球速度とインパクトパラメータ

バッティングは打球速度の最大化を目標としている。インパクト直後の打球特性(並進速度、回転速度)を決定する要因は、投球特性(並進速度、回転速度)、インパクト時のバットとボールの位置関係を表すインパクトパラメータ、バットのスイング特性、質量や慣性モーメントや材料特性等のバットの力学的特性である。このうち、打者自身の技術によって制御できる項目はインパクトパラメータとバットのスイング特性である。

城所ら(2011)は、大きな運動エネルギーを持った打球を放つためには、ボールをバットの芯を中心とした狭い範囲での正確なインパクトが重要であると報告している。また Crisco et al. (2002)はバットの長軸方向に関してインパクト位置がスイートスポットから離れるほど、打球速度が低下するとしている。これはバットのヘッド側でもグリップエンド側でも同様であった。またスイートスポット内でのインパクトであっても、短軸方向に関してバットの中央を外れたインパクトでは大きな打球速度を得られないと報告している。以上のことから、バッティングにおいて打球速度を最大化させるためには、インパクトパラメータの重要性がみてとれる。このバッティングにおける打球速度の最大化とインパクトパラメータの関係に関する知見を、バントにおける打球速度の最小化に適応させた考えが、バットの先端でのインパクトを強調した従来のバント指導である。

1.2.3 芯の定義

打球速度とインパクトパラメータの関係を明らかにするために、本論文におけるバットの芯を定義しなければならない。バッティングにおけるバットの芯は撃心か振動曲げモードの節のどちらか、もしくはその両方を用いてある程度の範囲をもつエリアとして表されることが多い。Cross(2004)は自由支持条件におけるバットの撃心と振動曲げモードの節は非常に近くに位置しているが、手で保持した場合、撃心が手の方へ移動したと報告している。撃心はグリップ位置との共役点であるため、手による支持で移動する。また、バントはバットを2ヶ所でグリップするため、撃心に対応する1点のグリップ位置を決定することに意味を持たないと考えられる。一方、振動曲げモードの節は物体固有のものである。特に1次および2次振動モードの振幅は、3次以上の高次振動モードにおける振幅に比べて十分に大きく、打球に影響を与える(Cross 1998)。本論文におけるバットの芯は、その位置を明確にするため、バットの最も先端にある1次および2次振動モードの節の midpoint とする。

1.2.4 グリップ位置の影響

バッティングにおいて打球速度はバットの支持法、つまりインパクト中に手によってバットに加えられる力の影響を受けないとされている (Van Zandt1992、Nathan2000、Adair2001、香川ら 2011)。これはインパクト時間とバットを伝わる波の速度に関係する。Nathan(2000)は、バットとボールが接触しているインパクト時間は約 1 ms であり、バットを伝わる波は 700 m/s であると報告している。バッティングでのインパクト位置からグリップ位置の距離を 0.70 m とすると、インパクトの衝撃が手に伝わり、さらにその手がバットに与えた力はインパクト位置に伝わるまで 2 ms 要する。このような理由から、インパクト中に手がインパクト位置に影響を与えることはないと示唆している。しかし、バントはバッティングと比較してインパクト位置とグリップ位置が近く、手がインパクト中のボールに影響を与えないとは言い難い。

1.3 目的・意義

これまでバントにおける打球速度とインパクトパラメータの関係は明らかにされていない。そのためバッティングにおける打球速度とインパクトパラメータの関係に関する研究結果を基とし、バントの打球速度を最小化させるために「バットの芯を外し、先端でインパクトする」指導が長期に渡り行われてきた。しかし、バントとバッティングでは相違点が多く、バント独自の打球速度とインパクトパラメータの関係を検証する必要がある。そこで本論文の目的は、野球のバントにおける打球速度を最小化させるインパクトパラメータを明らかにすることとした。

野球のバントにおけるバイオメカニクス研究は、来田(2009)の行った打球方向とバット角度の関係を検証した報告のみである。しかし野球においてバントは重要な作戦の1つである。また近年のプロ野球では低反発球の導入によって犠牲バント数が増加している¹¹ため、打球速度とインパクトパラメータの関係を明らかにする本論文の意義は十分に大きいと考えられる。

第 2 章 実験方法

2.1 被験者

被験者は野球競技経験を 5 年以上有する男性 19 名（年齢 23.6 ± 2.7 歳、身長 171.9 ± 6.1 cm、体重 69.5 ± 10.3 kg、競技歴 11.0 ± 2.6 年）であった。そのうち右打者が 13 名、左打者が 6 名であった。本実験の実施にあたり、早稲田大学倫理委員会、人を対象とする研究に関する審査委員会の承認を得た。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。

2.2 実測試技

被験者には十分な準備運動を行わせた後、バッティングケージにてバントを行わせた。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 33.0 m/s (118 km/h) で投じた。ドラム式マシンの設定は、投球特性を一定にさせるため、全試技において投球の発射位置、発射角度、初速度を一定にした。これを各被験者に、木製バット（ミズノ社製、2TW-10455YT、長さ 0.84 m、最大半径 0.0315 m、質量 0.910 kg、グリップエンドから重心位置までの距離 0.570 m）を用いて投手方向にバントするよう指示した。各被験者の両手それぞれのグリップ位置(右打者における右手をトップハンド位置、左手をボトムハンド位置)を試技毎で一定にさせるため、試合においてバントを行う際のグリップ位置に予め目印となるテープを貼付し、常にテープ上に第 3 中手指関節を置くようにバットを支持させた。打球がセンターラインを中心に左右各 15 度の範囲内に転がった試技を全て成功試技とした。

2.3 データ収集

バント動作中のバットとボールを、2 台の超高速カメラ（Vision Research 社製、Phantom Miro、撮影速度 2500 fps）を用いて撮影した（図 2-1）。各被験者 8 球ずつ、計 152 球を成功試技として収集した。

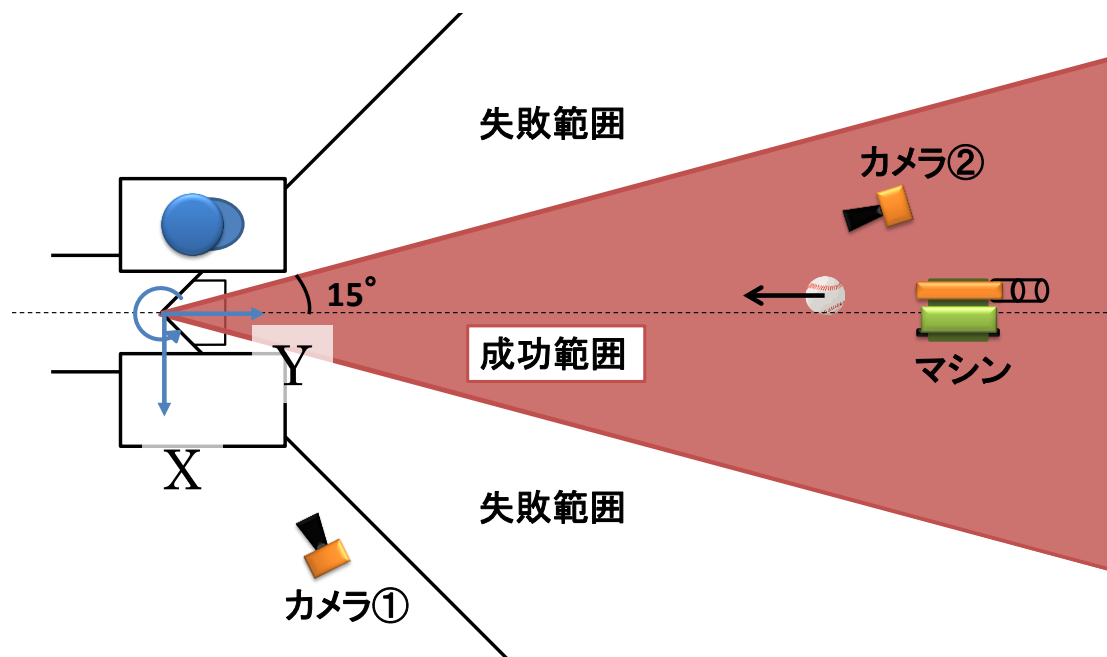


図 2-1 実験設定

2.4 データ処理

全成功試技のうち、3 次元分析に必要なデジタイズ点を明瞭に確認できる映像のみを分析対象とした。これにより、分析対象は各被験者につき 3 ～ 8 球、計 122 試技となった。ボールとバットの挙動は 2 台のカメラによって撮影された映像の、インパクトの瞬間およびその前後 10 フレーム（計 0.008 s）を分析区間とし、画像解析ソフトウェア（DHK 社製、Frame-DIAS）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中心およびグリップエンド中心とした(図 2-2)。

この時のデジタイズ位置の 3 次元座標は、各カメラの映像にて DLT 法を用いて以下の手順で取得した。実験試技前に図 2-3 のような 30 cm 間隔で各 4 点の較正点を付随した 17 本のポール、計 68 個の較正点を取り付けた放射状の較正器（スプートニック）を撮影範囲内に設置・撮影し、撮影した各較正点をデジタイズすることで 3 次元空間を構築した。より多くの較正点が各カメラを通して確認できるよう、スプートニックは任意の方向に回転させた状態で設置した。そのため、スプートニック座標系はグローバル座標系へ置き換える必要があった。グローバル座標系を定義するための 3 点（高さ 50 cm の同一水平面上の①ホームベース捕手寄りの頂点(:原点)、②原点からピッチングプレート中央へ向かう方向(:Y 軸)へ 1 m 地点、③Y 軸上以外の任意の点) をスプートニック撮影時と同一のカメラ設定にて設置・撮影し、デジタイズを行った。①から③に向かうベクトル $\mathbf{R}_{3/1}$ と①から②に向かうベクトル $\mathbf{R}_{2/1}$ を外積し Z 軸を、次に $\mathbf{R}_{2/1}$ と Z 軸を外積し X 軸を定義した。つまりグローバル座標系は、右打席から左打席へ向かう方向を X 軸、ホームベースからピッチングプレート向かう方向を Y 軸、鉛直上向き方向を Z 軸とした 3 軸から構成される(図 2-1)。スプートニック座標系からグローバル座標系への変換は、スプートニック座標系の原点をグローバル座標系の原点へ平行移動し、その後回転行列を用いて行った。左打者における各座標は YZ 平面で対称移動させ、右打者と同様のものとして分析を行った。験者のデジタイズの再現性を確認するため、本研究のデータ分析を行った初日から 5 日間において、ある 1 試技を 1 回ずつ、計 5 回行い、得られた角度データの標準偏差を調べた。各試技のデジタイズの妥当性を担保するため、分析区間の全コマにおけるバットヘッド座標とグリップエンド座標を用いて、バットの長さ(0.84 m)が 0.835 ~ 0.845 m でない場合は、再度デジタイ

ズを行った。

バット重心座標はバットヘッド座標とグリップエンド座標より算出した。打球速度はインパクトの 10 フレーム前から 2 フレーム前(0.0032 s)まで、および 9 フレーム前から 1 フレーム前までにおけるボールの中心点の変位から算出された 2 つの速度の平均値とした。同様の方法を用いて、グローバル座標系および、以下で説明するバット座標系の各成分におけるインパクト前のバット重心速度を算出した。また、打球速度はインパクトの 1 フレーム後から 9 フレーム後まで、および 2 フレーム後から 10 フレーム後までにおけるボール中心点の変位から算出された 2 つの速度の平均値とした。同様の方法を用いて、インパクト後のバット重心速度を算出した。上下方向の打球角度および打球角度は、打球および打球速度ベクトルと水平面とのなす角の大きさとした。

バット前額角度(図 2-4)はインパクト時のグリップエンドからバットヘッドへ向かうベクトル $\mathbf{R}_{bat}$ と、 $\mathbf{R}_{bat}$ を XY 平面に投影したベクトル $\mathbf{R}'_{bat}$ とがなす角の大きさとした。このときバットヘッドがグリップエンドよりも鉛直上方向に位置しているときを正とした。また、バット水平角度は $\mathbf{R}'_{bat}$ と X 軸とがなす角の大きさとした。このときバットヘッドがグリップエンドよりも投手方向に位置しているときを正とした。

インパクトパラメータを定義するため、インパクト時のグリップエンドの位置を原点として固定された $x''y''z''$ 座標系を定義した。グローバル(XYZ)座標系と向きが等しく、インパクト時のグリップエンドの位置を原点とした仮の座標系を xyz 座標系とし(図 2-5-①)、 xyz 座標を z 軸回りにインパクト時のバット水平角度分だけ回転させた第二の仮の座標系を $x'y'z'$ 座標系(図 2-5-②)、 $x'y'z'$ 座標系を y' 軸回りにバット前額角度分だけ回転させた座標系を $x''y''z''$ 座標系(図 2-5-③)とした。このとき、インパクト時の x'' 軸方向および z'' 軸方向におけるボール中心の位置をそれぞれ長軸インパクト位置、短軸インパクト位置とし

た(図 2-6)。なお、短軸インパクト位置はボールがバットの上部にインパクトしたときを正とした。また、インパクト時におけるボール中心とバットの断面中心を結んだ線分を衝撃線、衝撃線と水平面とがなす角の大きさを衝撃線角度と定義し、式①から算出した。

$$\text{衝撃線角度} = \sin^{-1}\left(\frac{\text{短軸インパクト位置}}{\text{バット最大半径} + \text{ボール半径}}\right) \quad \text{—式①}$$

x”y”z”座標系をさらに x”軸(バットの長軸)回りに衝撃線角度分だけ回転させた座標系をバット座標系とした。バット座標系はインパクト時の $\mathbf{R}_{bat}$ 方向を L 軸、バットの断面中心からボール中心へ向かう衝撃線方向を N 軸、L 軸と N 軸の外積方向を T 軸とした 3 軸から構成される(図 2-6)。

バットの長軸方向について、バットの芯から長軸インパクト位置までの距離を“芯からの距離”とした。本研究ではバットの芯を 1 次および 2 次振動モードの節の位置 (1 次: 0.685 m、2 次: 0.710 m) の中点であるグリップエンドから 0.697 m の位置とした。バントにおけるインパクト前のバットの重心速度は打球速度と比較して小さいため、衝撃線角度と打球角度が一致したとき、バットの短軸方向についてバットとボールが正面衝突したと定義し、この時の短軸インパクト位置を正面衝突位置とした。また正面衝突位置から短軸インパクト位置までの距離を“正面衝突からの距離”とした。

力積・運動量の法則を用いて、バットとボールから構成されるひとつの系(バット・ボール系)に対して、グリップしている手を与えた力の力積を算出し、バット座標系についての各成分として表した。

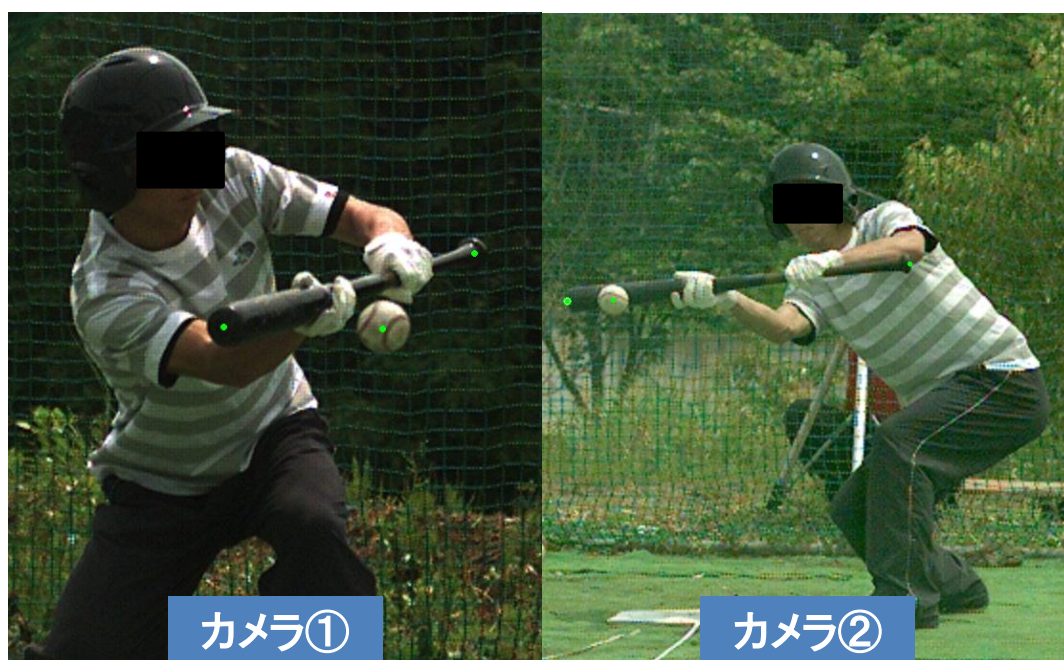


図 2-2 撮影した映像およびデジタイズ位置

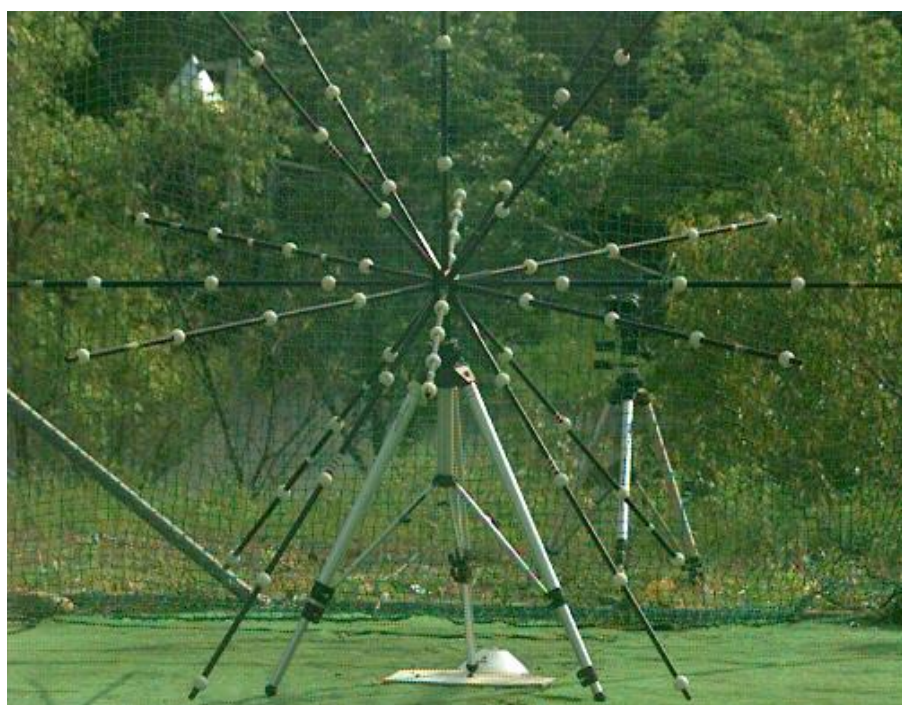


図 2-3 放射状の較正器(スポートニックス)

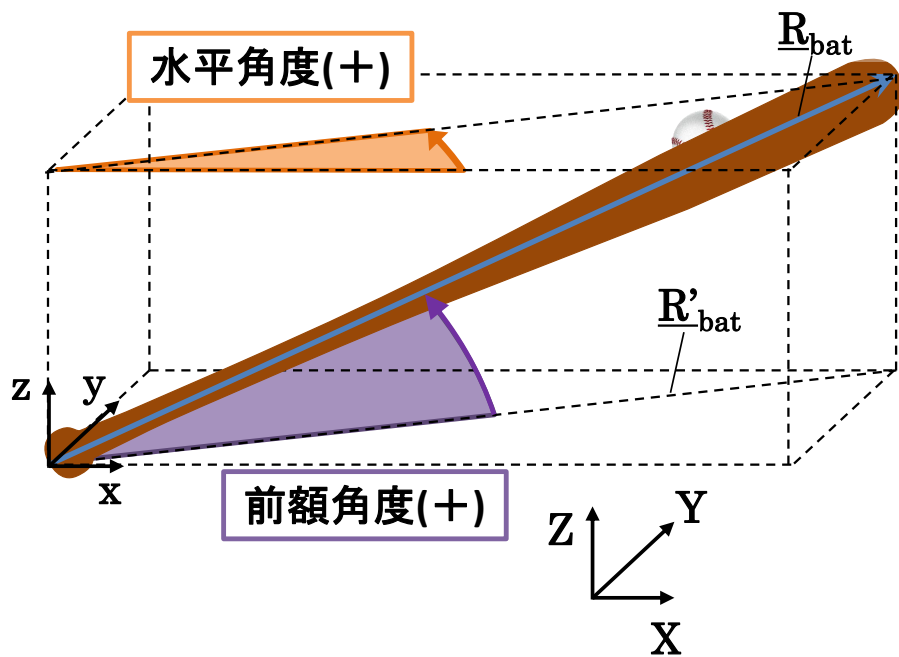


図 2-4 インパクト時のバット角度

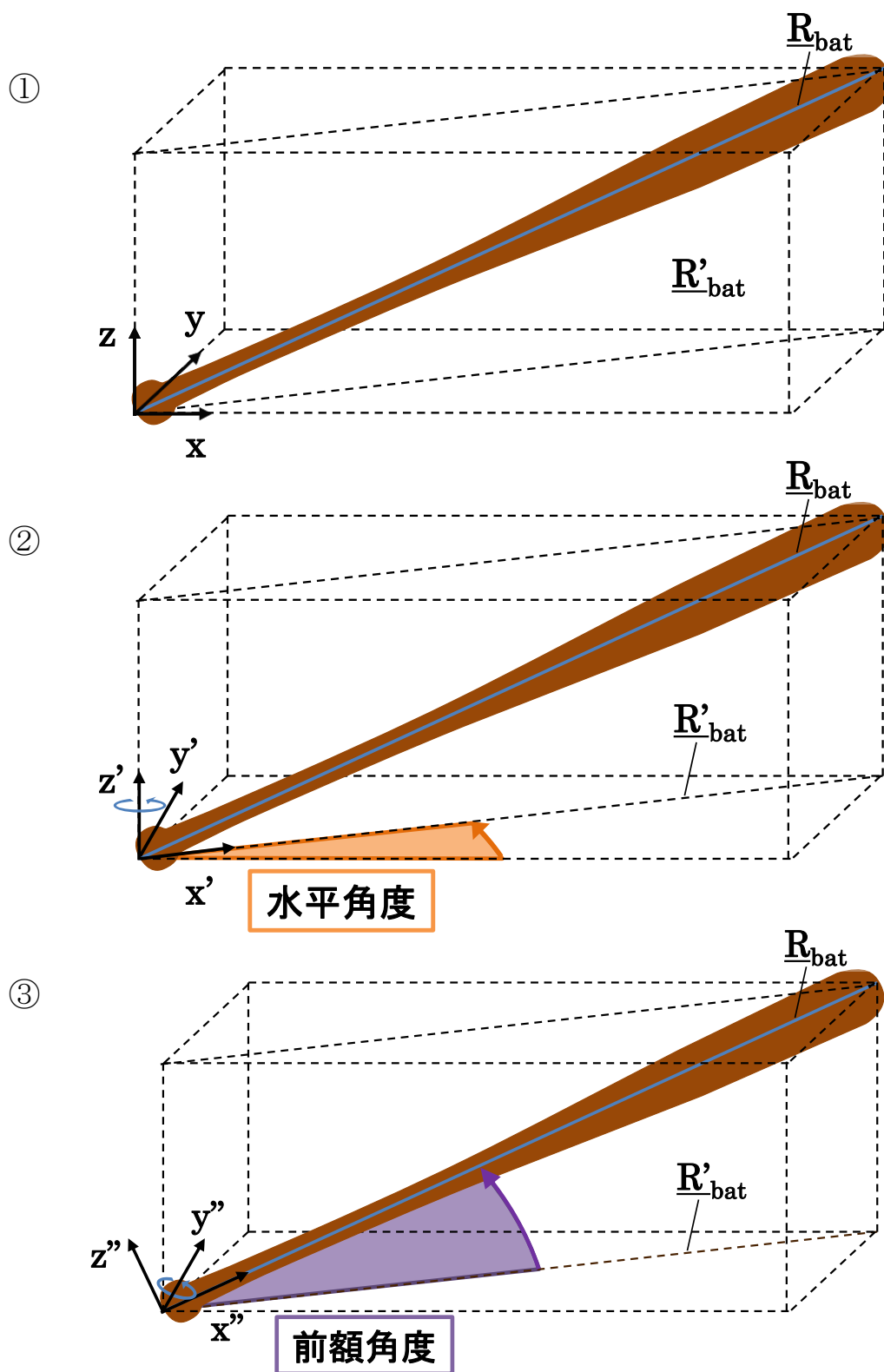


図 2-5 バット座標系定義へ過程

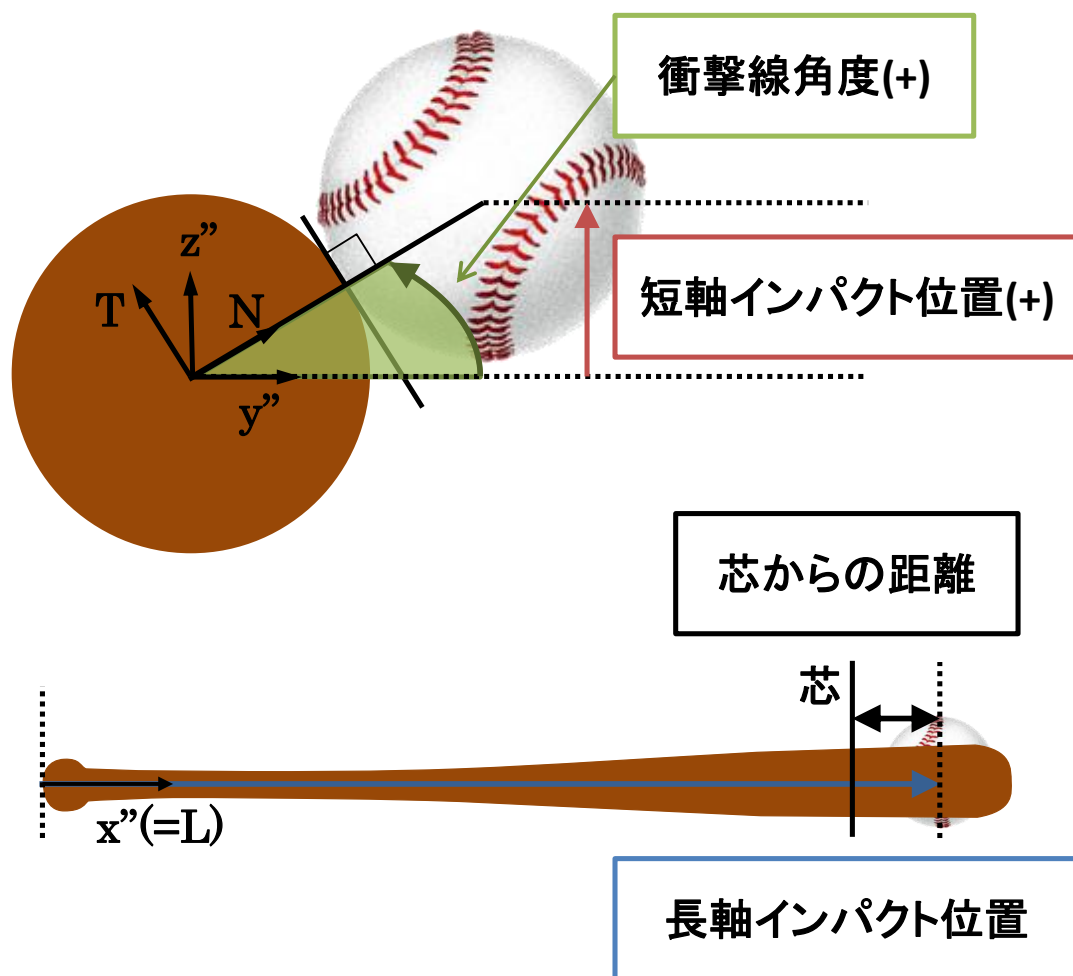


図 2-6 インパクトパラメータ

2.5 統計処理

本研究ではバントにおけるバットとボールの衝突現象を一般化するため、個人の有するスキルレベルの影響を除外し、分析対象試技の平均値および標準偏差を結果として示した。打球速度とインパクトパラメータとの関連を分析するため、打球速度と長軸インパクト位置、芯からの距離、正面衝突からの距離との関係をそれぞれ Pearson の積率相関係数を用いて分析した。また、打球速度とバットの挙動、グリップとの関連を分析するため打球速度とインパクト前後のバット重心速度(グローバル座標系およびバット座標系)、手がバット・ボール系に与えた力の力積のバット座標系における各成分との関係をそれぞれ Pearson の積率相関係数を用いて分析した。全ての分析について、有意水準を 5 %未満とした。

打球速度の変動を説明する因子を抽出するため、打球速度を従属変数として 2 つのモデルを用いて重回帰分析を行った。モデル 1 は独立変数をバット座標系におけるインパクト前のバット重心速度の各成分、芯からの距離、正面衝突からの距離とし、モデル 2 は独立変数をバット座標系におけるインパクト前のバット重心速度の各成分、長軸インパクト位置、正面衝突からの距離とした。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。全ての分析について、有意水準を 5 %未満とした。

第 3 章 結果・考察

3.1 グリップ位置

トップハンド位置およびボトムハンド位置はそれぞれグリップエンドより 0.544 ± 0.035 m、 0.172 ± 0.086 m であった。トップハンド位置は重心位置 (0.570 m) の近くに位置していた。本研究における被験者は、バットコントロールがしやすいバットの重心位置付近に、トップハンドを経験的に位置させていたと推察される。またボトムハンド位置は、バッティングにおける両手のグリップ位置を想定して決められた、材料試験方法である ASTM 規格でバットのパフォーマンスを評価する際に用いられる回転中心の位置(グリップエンドから 0.152 m(Smith2008、香川ら 2011))の近くに位置していた。試合中は守備側にバントを行うと断定されないようにするため、バッティングのグリップ位置からトップハンド位置をバントのグリップ位置に変更したり、逆にバントからバッティングに変更するバスターを用いたりする。そのため本研究においても、ボトムハンド位置はバッティングのグリップ位置の近くに位置したと推察される。

3.2 結果の妥当性、デジタイズの再現性

スプートニックを用いて画像解析ソフトウェアで構築された 3 次元座標空間の誤差は X 軸、Y 軸、Z 軸それぞれについて 1.3 mm、 1.6 mm、 1.5 mm であった。またある 1 試技について 5 回デジタイズを行った際のバット水平角度および前額角度、衝撃線角度の平均値と標準偏差はそれぞれ -2.2 ± 0.1 °、 8.8 ± 0.1 °、 21.4 ± 1.5 °であった。デジタイズによる角度誤差は平均値に対して非常に小さいものであった。これより、本研究における 3 次元座標を用いた以下の結果は十分な精度であったと考えられる。

3.3 投球コンディション

投球速度は 33.0 ± 0.7 m/s であった。平均値に対して変動係数が 2 %程度であったことから、ほぼ一定の速度で投射されたことを示す。同様に、投球角度は 4 ± 1 °であり、変動係数は 18 %であった。本研究における投球コンディションは概ね一定であったと考えられる(表 3-1)。したがって、本研究で観察された試技間の打球速度の変動は、投球の差異よりも打者の技術によって制御できるパラメータの変動に起因すると考えられる。

3.4 打球速度、バット重心速度、バット角度

打球速度および打球角度は表 3-1 に、グローバル座標系およびバット座標系におけるインパクト前後のバット重心速度は表 3-2 に、インパクト時のバットの前額角度および水平角度は表 3-3 に示した。バントの打球速度は投球速度を 32 %にまで減少させていることがわかった。またインパクト前のバットの重心速度は投球速度に対して 3 %であった。

表 3-1 ボール速度

		Mean $\pm$ SD	CV	Max	Min
投球	速度 (m/s)	33.0 ± 0.7	2.2	34.3	30.5
	角度 (°)	4.2 ± 0.7	17.9	6.7	2.7
打球	速度 (m/s)	10.5 ± 2.8	26.3	18.3	4.6
	角度 (°)	-22.4 ± 41.0	183.3	77.3	-85.5

表 3-2 バット重心速度

単位 (m/s)					
バット重心速度	成分	Mean $\pm$ SD	CV	Max	Min
インパクト前	X	0.3 $\pm$ 0.8	290.4	2.5	-1.5
	Y	0.1 $\pm$ 0.9	1103.3	2.5	-2.3
	Z	-1.1 $\pm$ 0.7	65.6	0.7	-3.2
インパクト後	X	0.7 $\pm$ 1.0	150.3	3.6	-2.0
	Y	-6.1 $\pm$ 1.0	17.1	-3.1	-8.5
	Z	-0.8 $\pm$ 1.3	166.3	2.3	-3.7
バット重心速度	成分	Mean $\pm$ SD	CV	Max	Min
インパクト前	L	0.3 $\pm$ 0.8	239.6	2.6	-1.5
	N	0.1 $\pm$ 1.0	1682.6	2.5	-2.6
	T	-1.0 $\pm$ 0.7	71.8	0.7	-3.1
インパクト後	L	0.6 $\pm$ 0.8	136.2	2.7	-2.0
	N	-6.3 $\pm$ 1.1	17.3	-3.4	-8.7
	T	-0.8 $\pm$ 0.9	112.2	1.5	-2.9

表 3-3 インパクト時のバット角度

単位(°)

バット角度	Mean ± SD	CV	Max	Min
前額	-0.9 ± 3.6	389.2	11.9	-9.7
水平	-1.7 ± 7.5	429.4	21.9	-16.6

3.5 インパクトパラメータ

正面衝突からの距離を算出するため、投球角度と衝撃線角度が一致したときの短軸インパクト位置である正面衝突位置を定める必要がある。短軸インパクト位置と衝撃線角度の関係式(式①)において、投球角度の平均値(4.2 °)を衝撃線角度として代入し算出したところ、正面衝突位置は短軸インパクト位置 0.0049 m であった。実際、バットの半径は長軸インパクト位置によって異なる。しかし、本研究で観察された長軸インパクト位置の最大値および最小値(表 3-4)におけるバットの周径囲から、同様に正面衝突位置を算出したところ 0.0049 m、0.0046 m であった。つまり、長軸インパクト位置による正面衝突位置の違い(0.3 mm)は微小であり、計測誤差を下回るものがあった。本研究では長軸インパクト位置に関わらず、正面衝突位置は短軸インパクト位置 0.0050 m であると定めた。

$$\text{衝撃線角度} = \sin^{-1}\left(\frac{\text{短軸インパクト位置}}{\text{バット最大半径} + \text{ボール半径}}\right) \quad \text{—式①}$$

長軸インパクト位置および芯からの距離、短軸インパクト位置および正面衝突からの距離、衝撃線角度を表 3-4、図 3-1 に示した。長軸におけるインパクト位置はバット長の 22 %にあたる 0.184 m の範囲に分布していた。

表 3-4 インパクトパラメータ

単位(mm)

	Mean $\pm$ SD	CV	Max	Min
長軸インパクト位置	708 $\pm$ 38	5.3	782	598
芯からの距離	32 $\pm$ 23	70.4	99	1
短軸インパクト位置	-1 $\pm$ 13	2434.5	26	-32
正面衝突からの距離	12 $\pm$ 8	70.1	37	0
衝撃線角度($^{\circ}$)	-0.5 $\pm$ 11.4	2368.6	22.2	-28.3

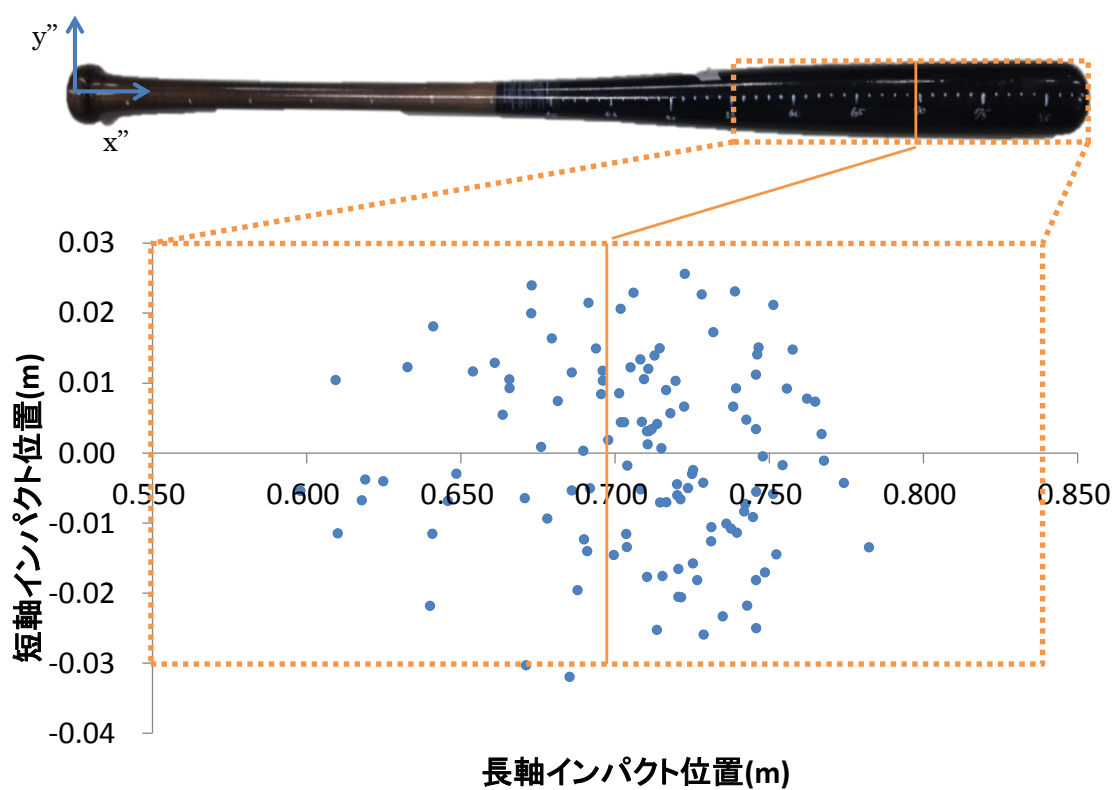


図 3-1 インパクトパラメータ

3.6 打球速度とインパクトパラメータ

打球速度と長軸インパクト位置、芯からの距離、正面衝突からの距離の関係をそれぞれ図に示した(図 3-2、図 3-3、図 3-4)。打球速度と長軸インパクト位置との間に有意な負の相関関係がみられた($r = -0.33$ 、 $p < 0.01$)。一方、打球速度と芯からの距離との間に有意な相関関係はみられなかった($p > 0.05$)。また打球速度と正面衝突からの距離との間に有意な正の相関関係がみられた($r = 0.64$ 、 $p < 0.01$)。

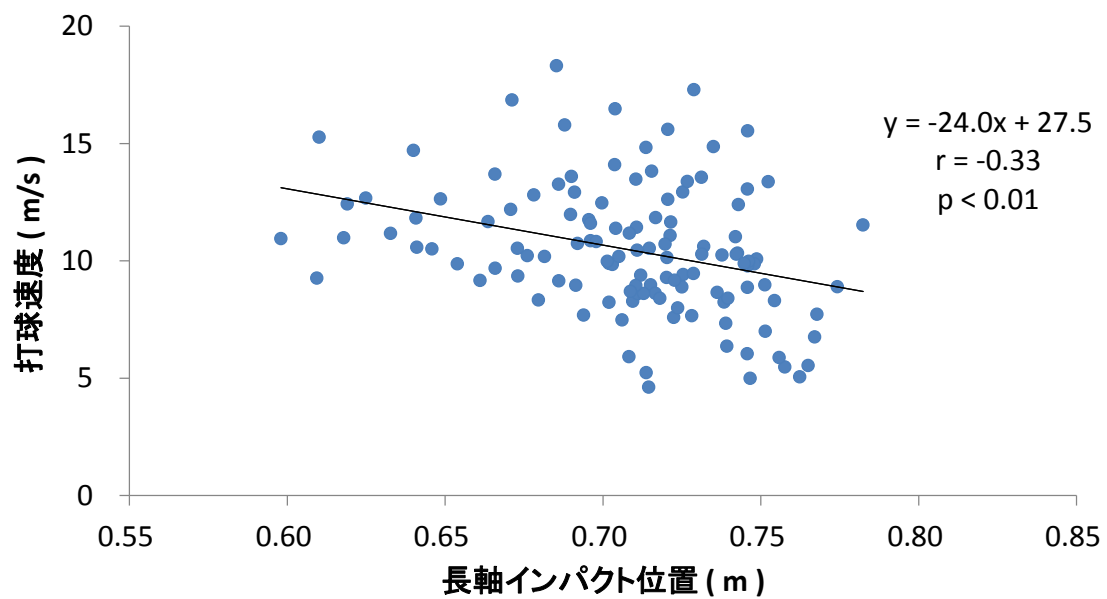


図 3-2 打球速度と長軸インパクト位置の関係

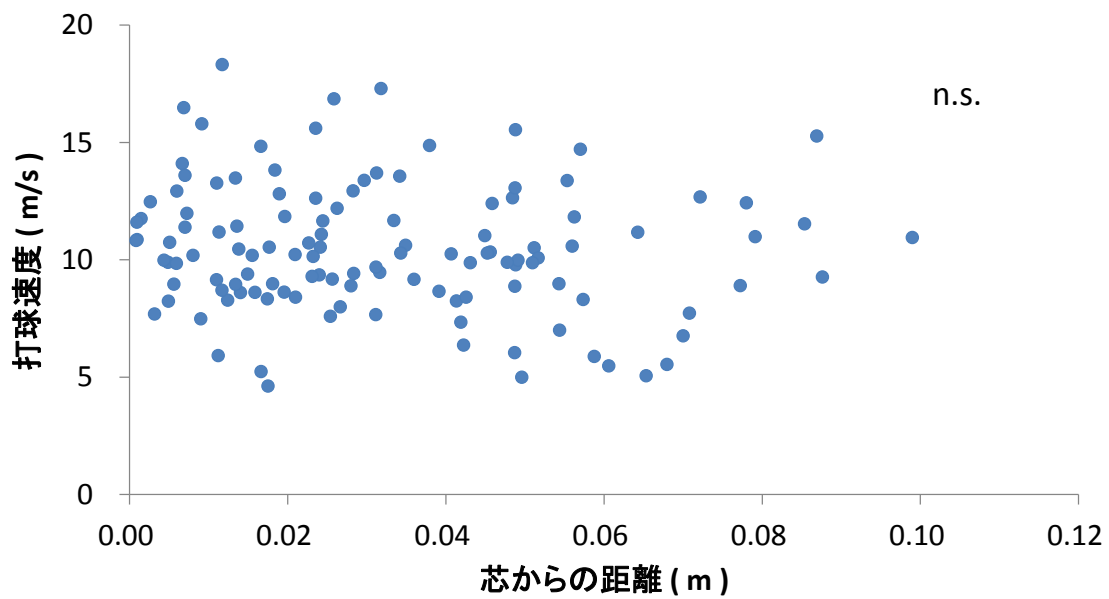


図 3-3 打球速度と芯からの距離の関係

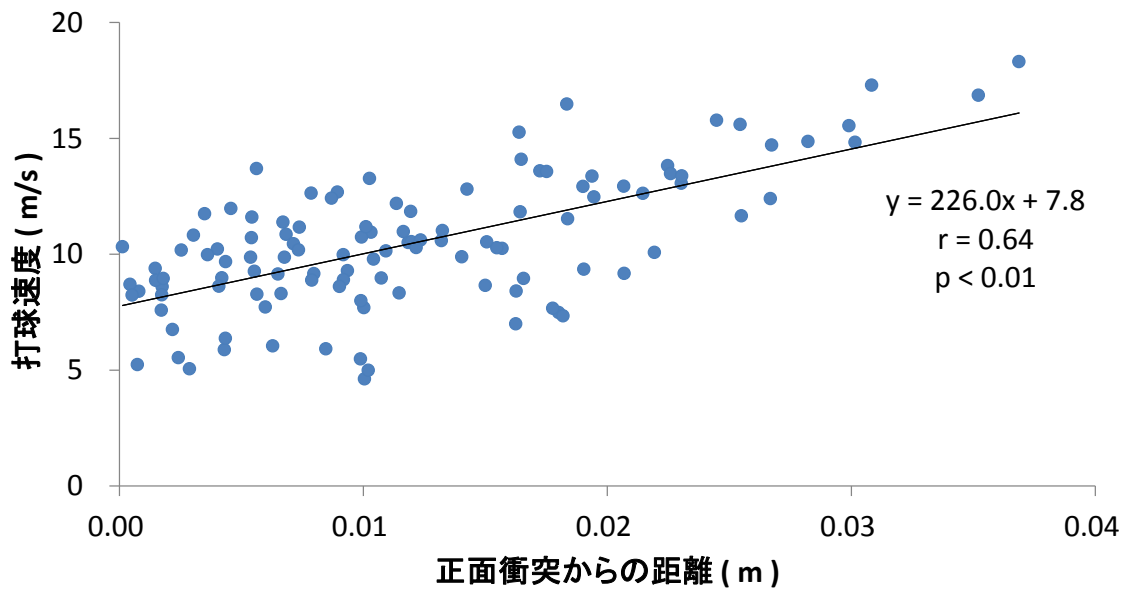


図 3-4 打球速度と正面衝突からの距離の関係

ステップワイズの重回帰分析を行った結果を表 3-5 に示した。モデル 1 では従属変数を打球速度(:Y)とし、正面衝突からの距離(:X₁)、インパクト前のバット重心速度 N 軸成分(:X₂)、長軸インパクト位置(:X₃)の 3 変数を独立変数とする有意な回帰式が得られた($Y=29.4+189.3X_1+1.4X_2-29.9X_3$ 、 $F = 133.1$ 、 $p = 0.00$)。その寄与率は 77 % ($r = 0.88$)であり、推定値の標準誤差は 1.3 m/s であった。これは正面衝突からの距離、インパクト前のバット重心速度 N 軸成分、長軸インパクト位置で打球速度の変動の 77 %を説明できることを示すものである。

モデル 2 では従属変数を打球速度(:Y)とし、正面衝突からの距離(:X₁)、インパクト前のバット重心速度 N 軸成分(:X₂)、芯からの距離(:X₃)の 3 変数を独立変数とする有意な回帰式が得られた($Y=9.0+189.5X_1+1.3X_2-24.4X_3$ 、 $F = 71.8$ 、 $p = 0.00$)。その寄与率は 65 % ($r = 0.80$)であり、推定値の標準誤差は 1.7 m/s であった。これは正面衝突からの距離、インパクト前のバット重心速度 N 軸成分、芯からの距離で打球速度の変動の 65 %を説明できることを示すものである。

以上のことから、バントにおける打球速度を規定する因子の中で最も重要な因子はバットの短軸方向におけるインパクト位置である正面衝突からの距離であり、打球速度の変動の 41 %を説明できることが示された。次に重要な因子はインパクト前のバット重心速度 N 軸成分であり、打球速度の変動の 20 %を説明できることが示された。そして第 3 因子として長軸インパクト位置で打球速度の変動の 17 %を説明できるという順序付けがなされた。つまり「バットの芯を外し、先端でインパクトする」ことは、バットとボールを正面衝突させる技術とインパクト前のバット重心速度を調整する技術による影響の次に重要性をもつ技術であることが示された。すなわち、バントにおいて最も重視すべき指導は「芯を外す」ことよりも「正面衝突させる」ことであると考えられる。

表 3-5 ステップワイズの重位回帰分析結果

モデル 1 従属変数:打球速度

投入された変数	標準化偏回帰係数	相関係数	R ² 増加量
正面衝突からの距離	0.57	0.64*	0.41
インパクト前の バット重心速度N軸成分	0.51	0.54*	0.20
長軸インパクト位置	-0.41	-0.33*	0.17
決定係数R ²			0.77

*:p<0.05

除外された変数:インパクト前のバット重心速度 L および T 軸成分

モデル 2 従属変数:打球速度

投入された変数	標準化偏回帰係数	相関係数	R ² 増加量
正面衝突からの距離	0.57	0.64*	0.41
インパクト前の バット重心速度N軸成分	0.48	0.54*	0.20
芯からの距離	-0.20	-0.12*	0.04
決定係数R ²			0.65

*:p<0.05

除外された変数:インパクト前のバット重心速度 L および T 軸成分

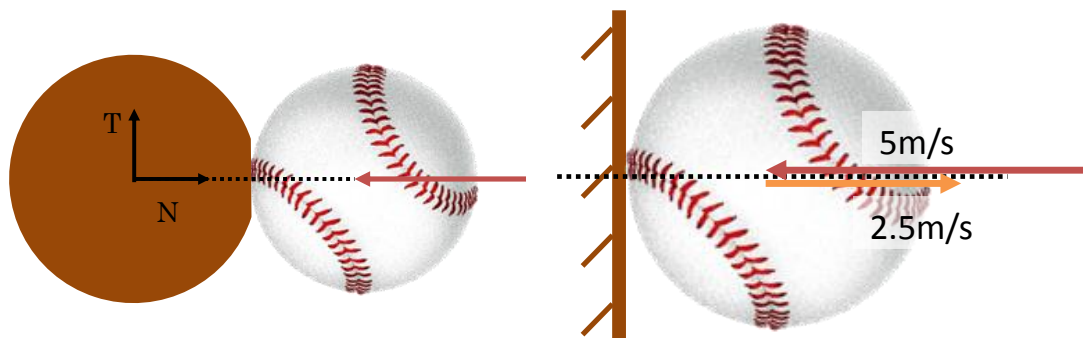
3.7 直衝突と斜衝突

打球速度と正面衝突からの距離との間には有意な相関関係があった。この結果は、バットの短軸方向において正面衝突から遠ざかる位置でインパクトした試技ほど、打球速度が大きかったことを示すものである。正面衝突は直衝突とよばれ、衝突する 2 物体間の相対速度ベクトルと衝撃線が同一線上に位置するものである。ボールとバットの断面は円形であるが、ボールとバットの断面中心を結ぶ線分（衝撃線）とバットに対するボールの相対速度ベクトルが同一線上に位置するものが直衝突となる（図 3-5 上）。衝突中にボールに作用する復元力は衝撃線を作用線とする力となるので、直衝突の場合、この力はボールを飛来した方向に押し返すことになる。したがって、このボール・バット間の直衝突は、バットの打撃面が飛来するボールに正対する平面であったとみなすことのできる衝突となる。一方、正面衝突から遠ざかった位置でのボールインパクトは、バットに対するボールの相対速度ベクトルと衝撃線とが同一線上に位置しないため（図 3-5 下）、斜衝突となる。斜衝突においてもボールに作用する復元力は衝撃線を作用線とする力となるので、この衝突は、バットの打撃面が飛来するボールに対して傾いた平面（衝撃線に対して垂直な平面）であったとみなすことのできる衝突である。したがって、正面衝突からの距離が大きな衝突ほど、バットの打撃面が飛来するボールに対して大きく傾いた平面への斜衝突とみなせるものとなる。摩擦の影響が無視できるほど小さいと仮定すると（つまり、打撃面に平行な方向に作用する力 ≈ 0 と仮定する）、ボールの相対速度の T 軸成分（打撃面に平行な成分）が変化せず、ボールの運動量の T 軸成分は保存されるため、直衝突よりも斜衝突の方が衝突後のボールの速度は大きくなる（図 3-5）。実際にはボールとバットの間に摩擦の力が作用したと考えられるが、実験結果から考察すると、この影響は限定的なものであった。

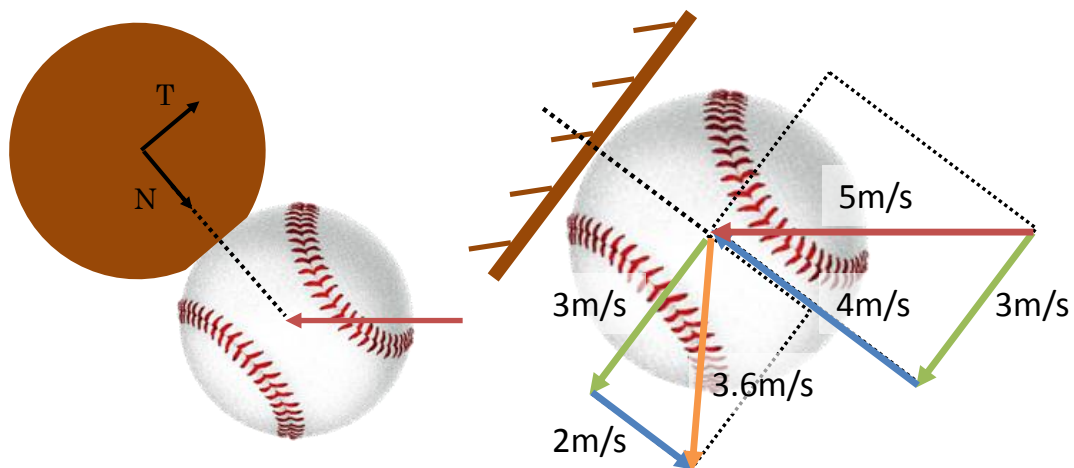
打球速度と正面衝突からの距離との関連を、バットとボールとの間の運動量

の転移として捉え、考察する。バントにおいて、インパクト前にバットが有する運動量の N 軸成分は、ボールの有する運動量の N 軸成分よりも小さい。そのためインパクトによって、ボールの運動量はバットに転移する。特に、正面衝突に近づくほどボールがバットに与える力積は大きく、転移する量も大きい。ため(図 3-6)正面衝突に近づくほど、打球速度を小さくすることができたと考えられる。一方バッティングの場合、インパクト前においてボールに比べてバットの方が大きな運動量を有する。そしてそのバットの有する運動量を効率よくボールに転移させるにはバットとボールを正面衝突させるとよい。つまりバットの短軸方向における正確なインパクトは、打球速度を大きくするためというより、ボール・バット系における運動量の転移の効率を高めるために重要だと考えられる。打球速度とインパクト後のバット重心速度 N 軸成分にも有意な正の相関関係($r = 0.54$ 、 $p < 0.01$ 、図 3-7)がみられることも、これを支持している。バントはボールの運動量がバットに転移し打球速度が小さくなる衝突現象であり、バッティングはバットの運動量がボールに転移し打球速度が大きくなる衝突現象であるため、同じ物理現象でありながら、正反対の結果を生み出すことになったと考えられる。

正面衝突＝直衝突



斜衝突



$e=0.5$ 摩擦なし	← 打球速度	← 速度・法線成分
	← 打球速度	← 速度・接線成分

図 3-5 入射角度による打球速度の違い

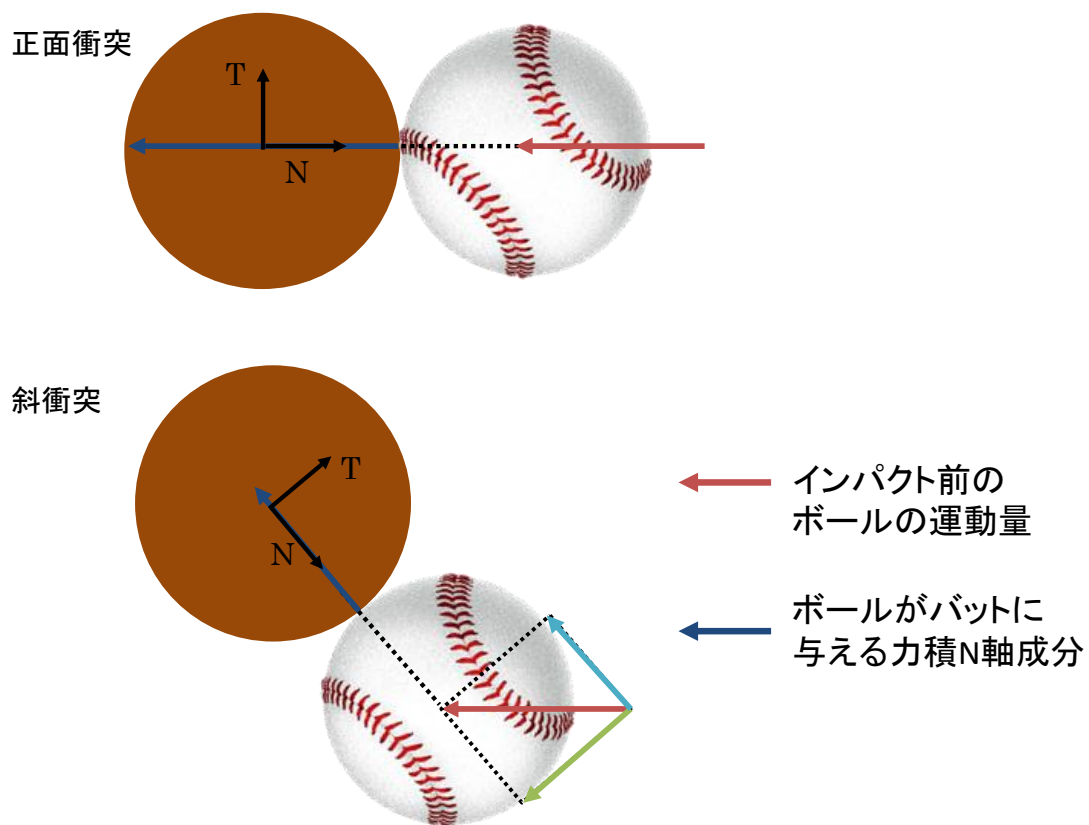


図 3-6 短軸インパクト位置によるバットに与える力積の違い

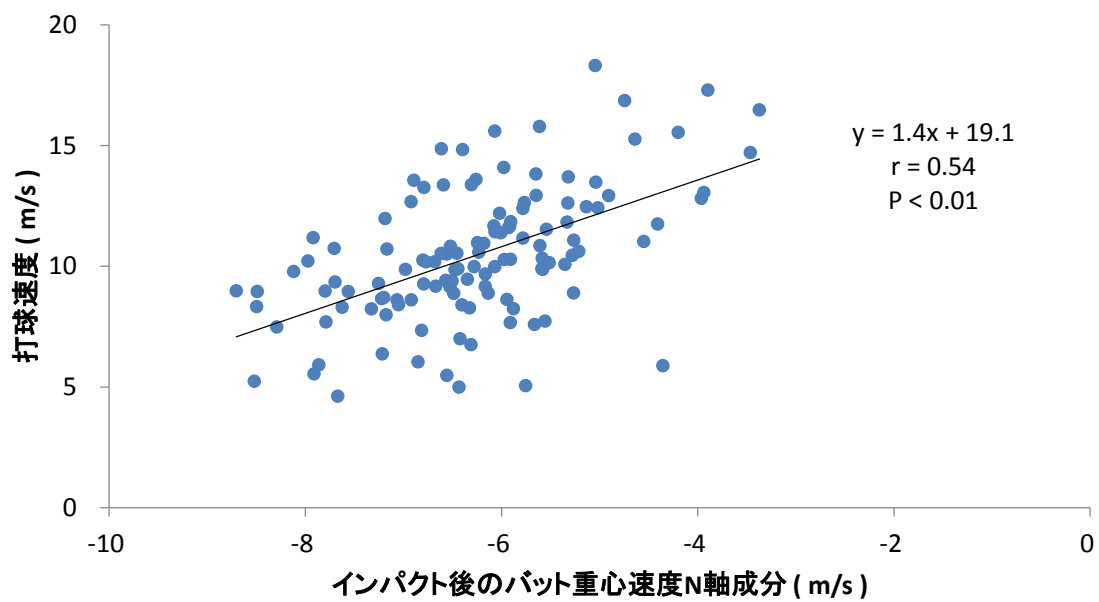


図 3-7 打球速度とインパクト後のバット重心速度 N 軸成分の関係

3.8 力積・運動量の法則

力積・運動量の法則を用いて、手がバット・ボール系に与えた力積の各成分を算出し、打球速度とバット座標系における手がバット・ボール系に与えた力積の各成分の関係を図 3-8 に示した。打球速度と力積の各成分との間に有意な相関関係はみられなかった。また図 3-6 より、バットとボールが正面衝突から遠ざかると、ボールがバットに与える N 軸方向への力積が小さくなるため、バットをグリップしている手がバット・ボール系に与える力積も同時に小さくなると推測された。しかし図 3-9 が示す通り、正面衝突からの距離と手がバット・ボール系に与えた力積 N 軸成分との間に有意な相関関係はみられなかった。また、インパクトパラメータと手がバット・ボール系に与えた力積の間にも有意な相関関係はみられなかった。一方、打球速度とインパクト前のバット重心速度 N 軸成分との間には有意な相関関係がみられた($r = 0.54$, $p < 0.01$, 図 3-10)。これらのことは、インパクト前のバットの挙動は打球速度に影響を与えるが、インパクト中の短い時間内に手がバット・ボール系に与えた力の力積は打球速度に影響を与えるほどではなかったことを示している。つまり、打球速度を決定する要因はインパクト中ではなく、インパクト前に手が与えたバットを操作するための力であることが示唆された。

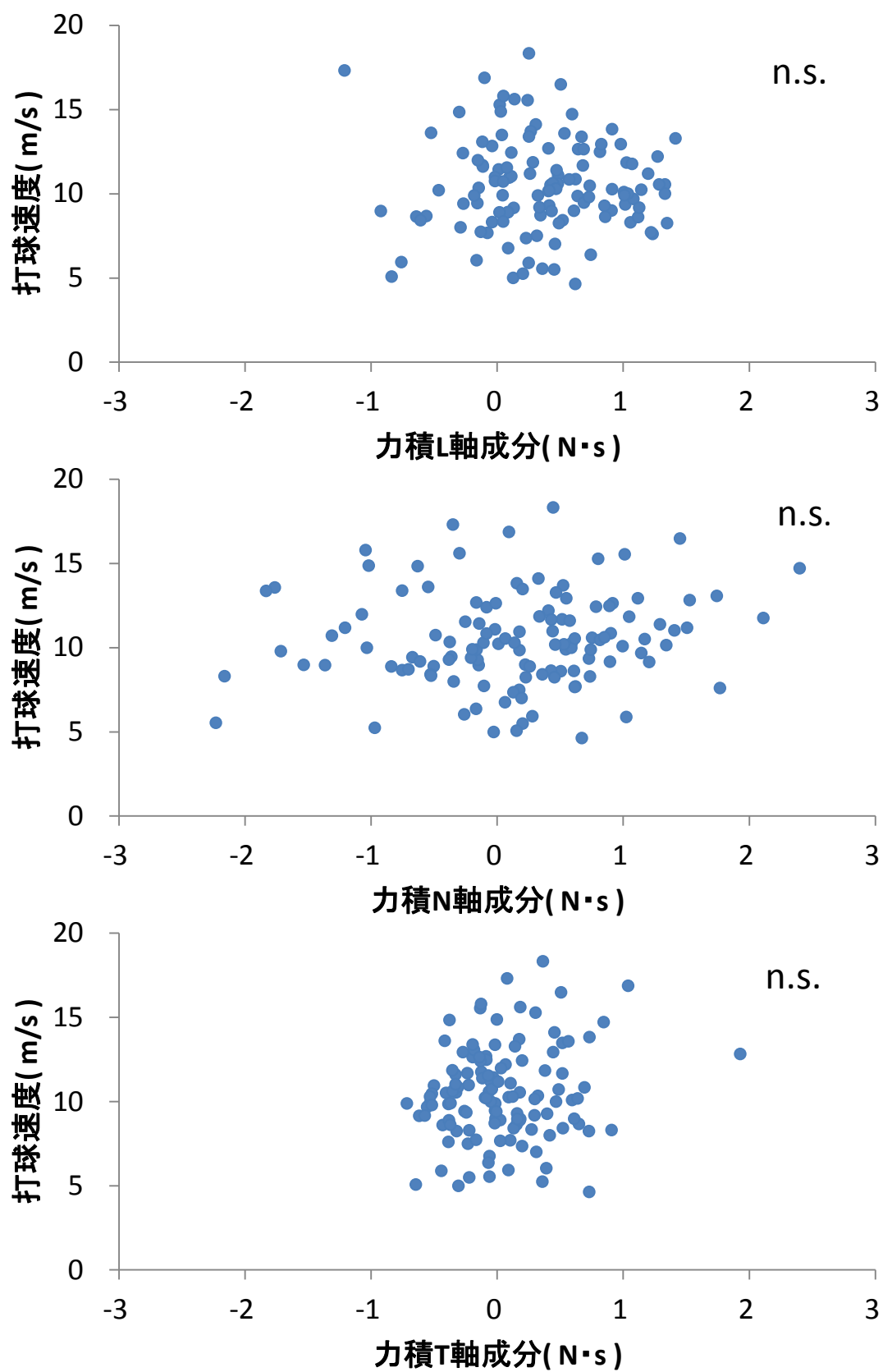


図 3-8 打球速度と手がバット・ボール系に与えた力積の関係

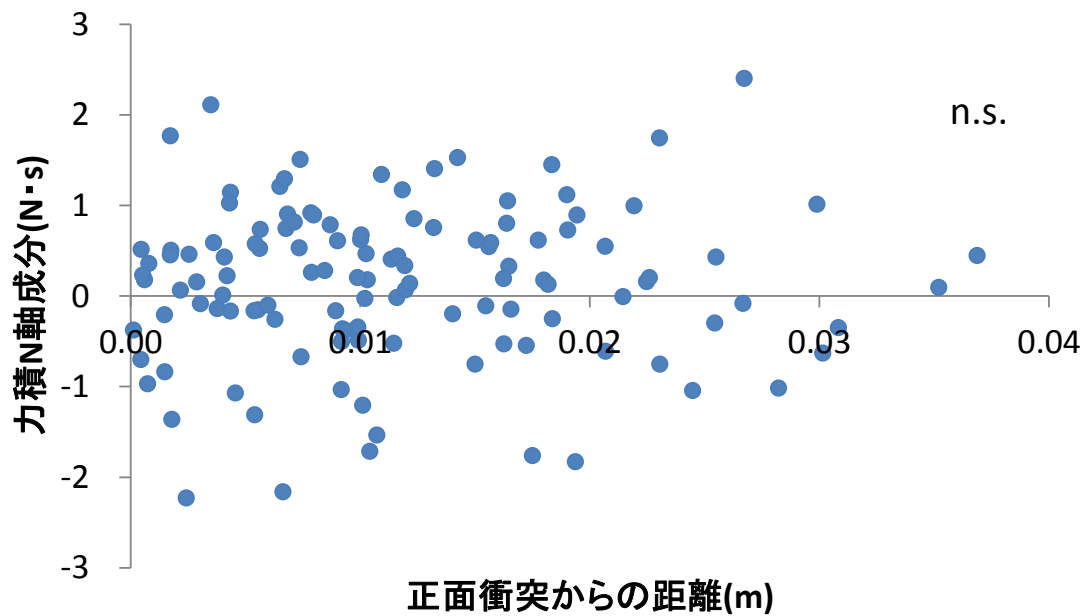


図 3-9 手を与えた力積 N 軸成分と正面衝突からの距離

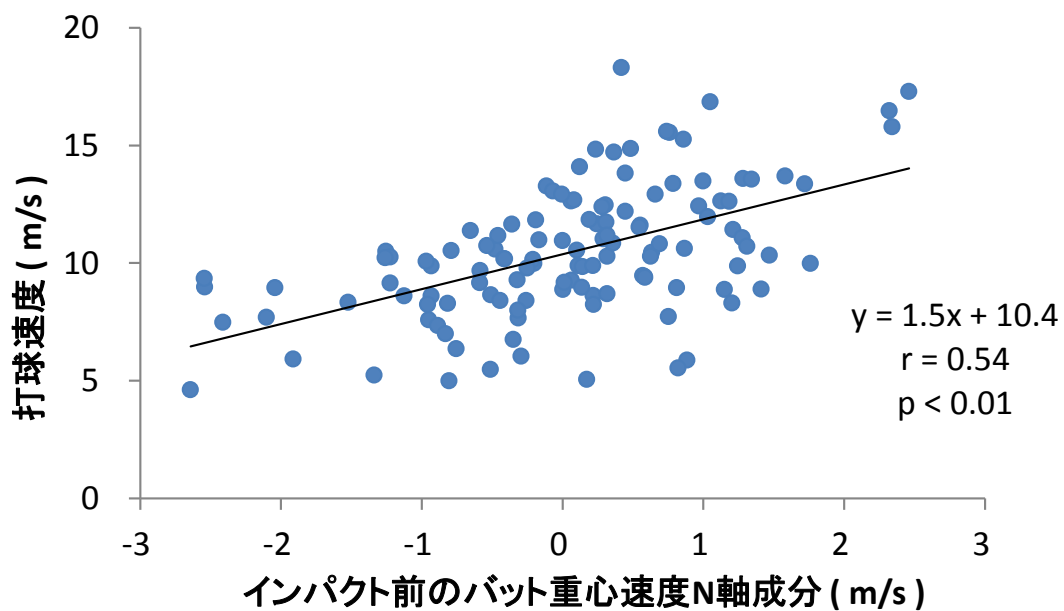


図 3-10 打球速度とインパクト前のバット重心速度 N 軸成分の関係

3.9 打球速度とインパクト前のバット重心速度

打球速度とグローバル座標系におけるインパクト前のバット重心速度 Y 軸成分との間に有意な正の相関関係がみられた($r = 0.40$ 、 $p < 0.01$ 、図 3-11)。バット重心速度 Y 軸成分とは投手方向へのバットの押し引きを表す。つまり、本研究で得られた結果の範囲内において、バットを捕手方向へ引きながらインパクトを迎えるほど、打球速度は低下した。これは運動量の観点から考察すれば明らかなことである。

前節までにおいて、バット重心速度をグローバル座標系からバット座標系へ変換したことは、バットとボールのインパクトを物理現象として捉えるために重要なことであった。しかし、バット座標系はインパクト時のバット角度や短軸方向のインパクト位置によって各試技で座標軸が異なるため、バット座標系におけるバット重心速度を打者が制御することは困難である。一方、グローバル座標系の座標軸は常に一定である。そのため、グローバル座標系におけるインパクト前のバット重心速度は、打者が意図して操作することができるパラメータであり、打球速度との関連を現場にも容易に応用できると考えられる。

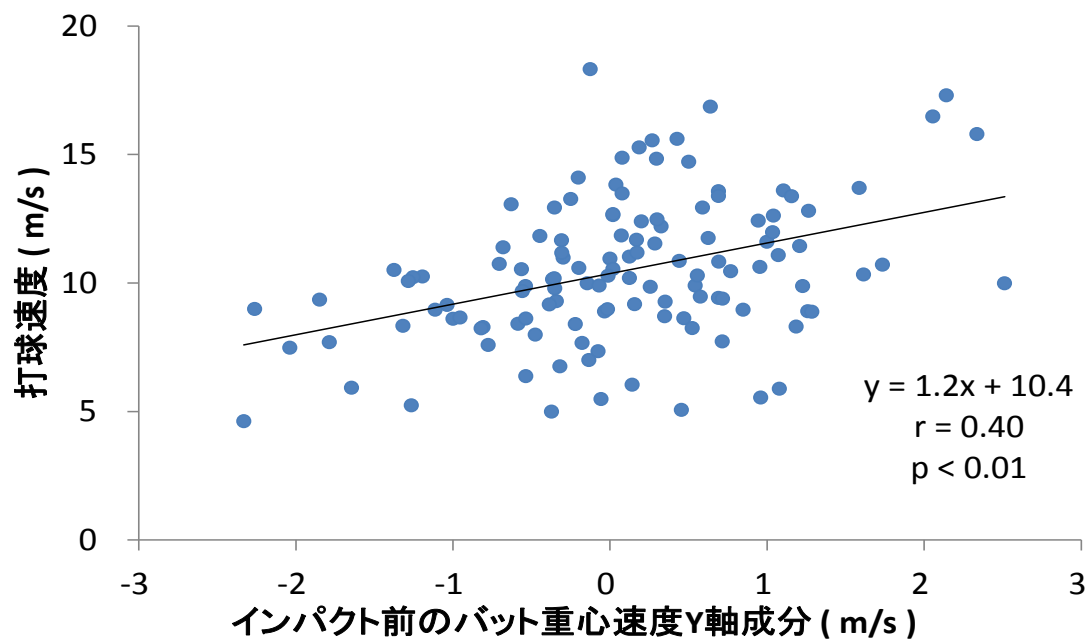


図 3-11 打球速度とインパクト前のバット重心速度 Y 軸成分の関係

3.10 打球速度と長軸方向のインパクト位置

長軸方向のインパクト位置について考察を進めるにあたり、短軸方向のインパクト位置は一定の位置であったと仮定する。Crisco et al. (2002)はバッティング実験を行い、長軸方向のインパクト位置について芯から離れたインパクトほど打球速度が小さくなることを報告している。しかし本研究においては、打球速度と芯からの距離の間には相関関係がなかった。一方、打球速度と長軸インパクト位置との間には有意な相関関係があり、重回帰分析においても長軸インパクト位置を投入したモデル 2の方が芯からの距離を投入したモデル 1よりも決定係数が 12%高くなった。これには 2つの理由が考えられる。バットを剛体と捉えたときのバットがボールになす仕事の影響と、バットを弾性体と捉えたときのバットの振動の影響である。

3.11 バットの仕事

インパクト時間は非常に短いながらも、バットとボールは少なからず接触した状態を保ちながら移動する。同じインパクト時間かつ同じ回転中心であると仮定したとき、先端に近い位置でインパクトするほど回転半径が長くなるため、バットに接触した状態でのボールの移動距離は長くなる(図 3-12)。インパクト中のボールの変位は、打球が転がる投手方向とは逆の方向である。つまり、先端に近い位置でインパクトした場合、バットがボールになす負の仕事によってボールの運動エネルギーは失われ、その結果として打球速度が小さくなったと考えられる。このため、打球速度と長軸インパクト位置に有意な相関関係がみられ、一方で打球速度と芯からの距離には相関関係がみられなかったと考えられる。ただしこの考えは、インパクト時間が正確に計測できなかったため、ひとつの仮説とする。

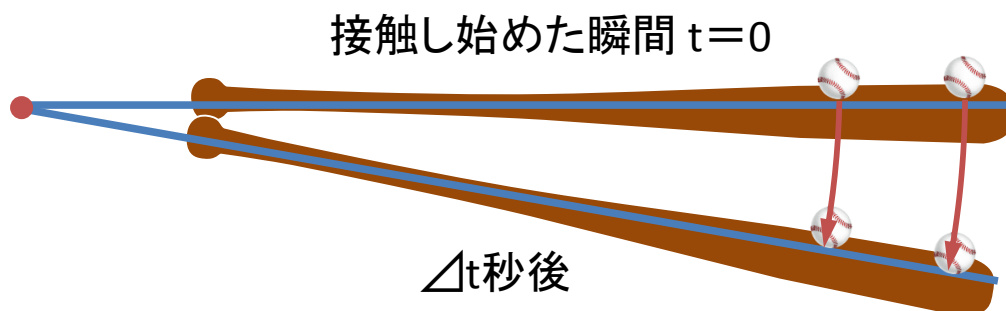


図 3-12 バットとボールが接触している Δt 秒間の挙動

3.12 バットの振動

3.12.1 バットの振動実験・目的

バットはボールによって瞬間的に外力を与えられ、振動する。統計結果から、本論文で設定したバットの芯、すなわち振動曲げモードの節の位置がグリップした手の影響でグリップエンド方向に移動したと推察される。そこで両手によって支持されたバットの振動曲げモードの節の位置を検証するため、振動実験を行った。この振動実験の目的は、異なるグリップ位置およびグリップの強弱による、バットの振動曲げモードの節の位置を特定することであった。

3.12.2 方法

振動曲げモード解析をするため打撃試験を行った(図 3-13)。振動を発生させる動的な作用である加振には加振力ハンマを用いた。またグリップエンドにて加振による動的な応答を計測した。打撃ハンマによる加振入力およびグリップエンドの応答を測定し、周波数解析 (FFT 解析) を行うことで固有振動数を図 3-14 のように算出した。横軸は周波数、縦軸はアクセラランス (単位加振力あたりの加速度応答) を示しており、アクセラランスがピークを示した周波数がバットの持つ固有振動数であり、周波数の小さい順に各モードの固有振動数を表している。

測定した試技の種類は、バットをゴムで括り吊るした自由支持条件と両手で支持した弾性支持条件とした。弾性支持条件は次の全 6 種類とした。バットをグリップする力を変化させた 2 条件(強条件、弱条件)、トップハンド位置をバット重心位置である 0.57 m、ボトムハンド位置を 0.07 m(長条件)、0.25 m(中条件)、0.50 m(短条件)の 3 条件(図 3-15)の掛け合わせとした。グリップする際は掌がバットに接触するようにし、強条件では験者は全力でバットを握り、弱条件では極力握力を加えないこととした。本振動実験における験者の握力は電

子握力計を用いて計測したところ両手共に 35 kg であった。以下、弾性支持の各条件をグリップする力の条件、ボトムハンド位置条件の順で記述する。例えばグリップ力が強条件、ボトムハンド位置が長条件であった場合、強長条件とする。打撃試験は加振移動法を用いた。バットの長軸方向に関してグリップエンドから 0.05 ～ 0.80 m において、グリップしている手を避けて加振した。加振位置は 0.05 ～ 0.50 m は 0.05 m 毎、0.65 ～ 0.79 m まで 0.02 m 毎とした。



図 3-13 打撃試験

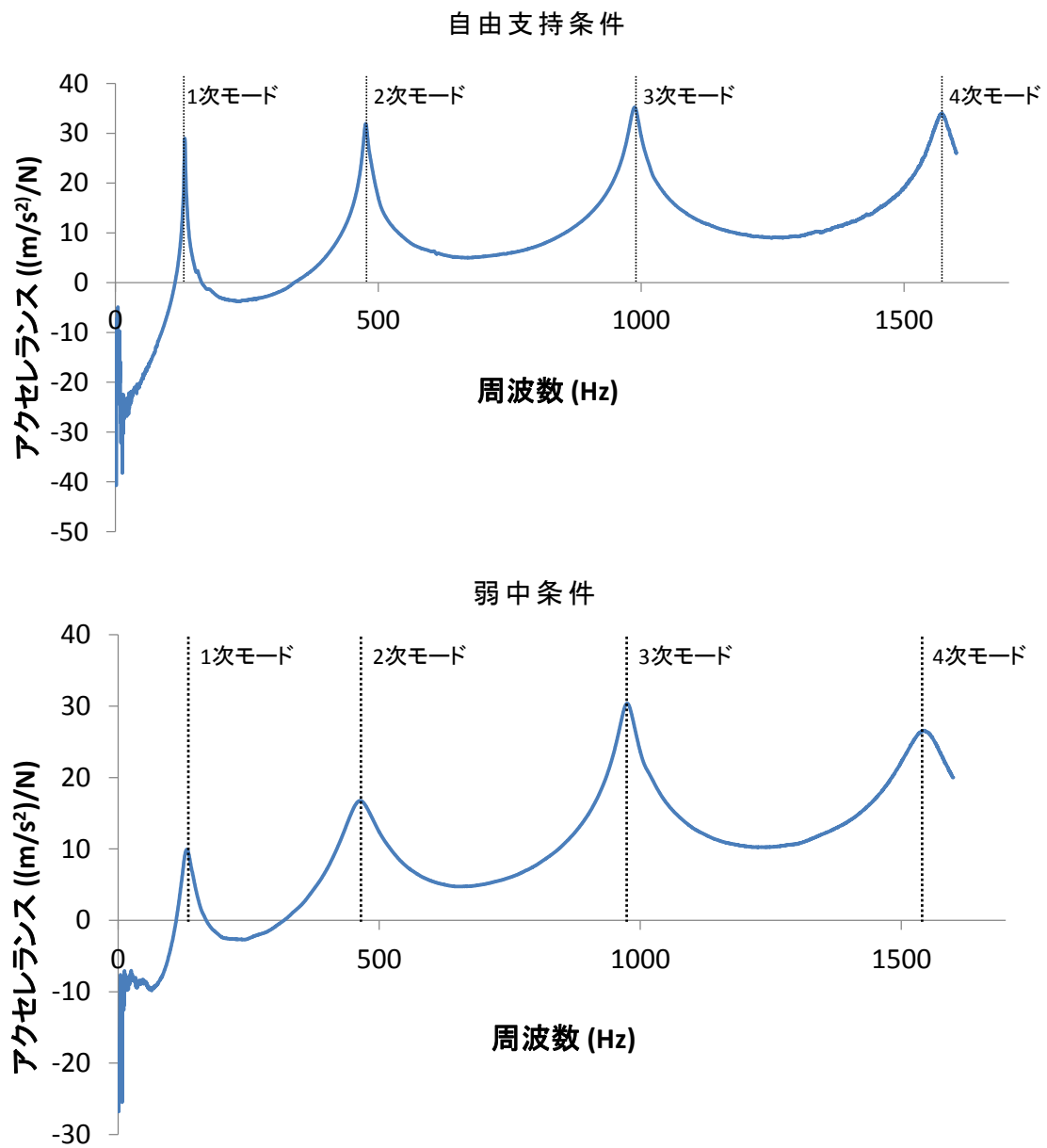


図 3-14 打撃試験により得られたバットの固有振動数



図 3-15 グリップ条件

3.12.3 結果・考察

各試技における振動によるバットの変形を可視化し(図 3-16)、それぞれにおける最も先端の節の位置を求めた(表 3-6)。バッティングでは振幅の大きさから 3 次以上の高次振動モードは無視されるが、弾性支持条件ではいずれの条件においても 2 次振動モードよりも 3 次振動モードのアクセラランスが大きくなったため、本実験においては 3 次振動モードも考慮することとした。

弱長条件の 2 次振動モードを除いた全条件において振動曲げモードの節が自由支持条件よりもグリップエンド寄りに位置していた。すなわちグリップ力やボトムハンド位置の条件を問わず、バットを手で支持することによって、バットの芯はグリップエンド方向におよそ 1 ~ 2 cm 移動したことが明らかとなった。バントにおけるバットの芯は、撃心だけでなく振動曲げモードの節についてもバッティングにおけるバットの芯とは一致しなかった。そのためバントにおける打球速度と長軸方向のインパクト位置の関係は、バッティングのように芯からの距離が大きくなるほど打球速度が低下するのではなく、バットの先端に近づく(長軸インパクト位置が大きくなる)ほど打球速度が低下したと考えられる。振動曲げモードの節から離れた位置でインパクトするとバットは大きく振動する。それによって投球の有する運動エネルギーの一部はバットや手の振動に変換・消失されるため、打球速度が小さくなることは先述した通りである。

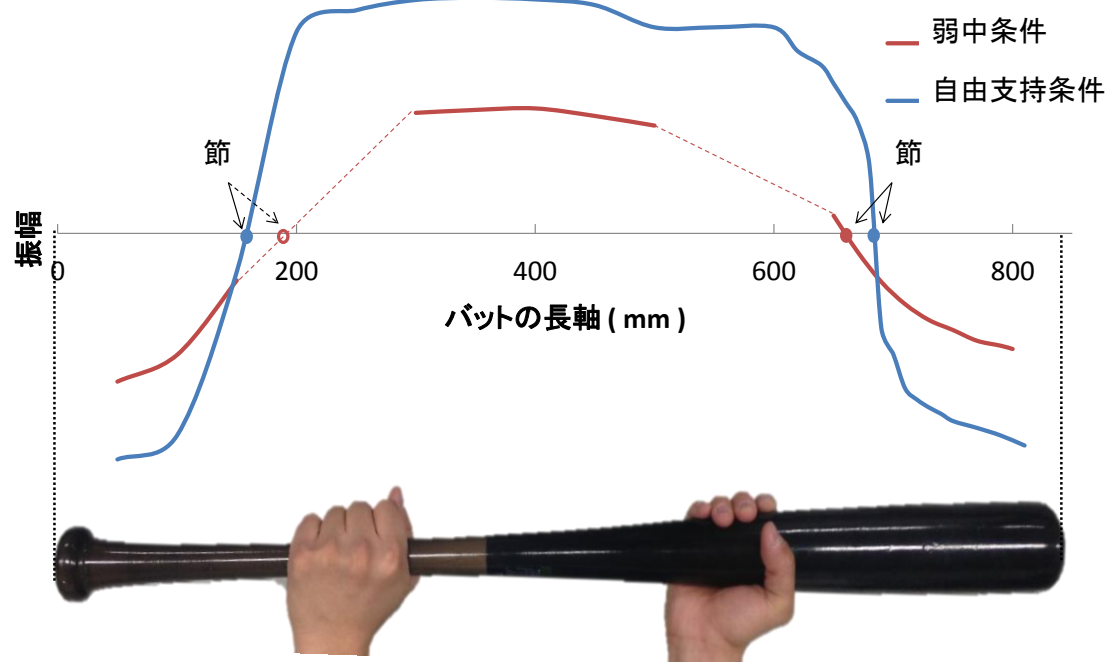


図 3-16 振動によるバットの変形と節の位置

表 3-6 振動曲げモードの節の位置

単位(mm)							
	自由	弱短	強短	弱中	強中	弱長	強長
1次	685	660	NO DATA	666	NO DATA	670	651
2次	710	706	701	708	NO DATA	713	709
3次	755	735	732	735	728	735	722
Mean I	697	683	—	687	—	692	680
Mean II	716	700	—	703	—	706	694

Mean I : 1 次、2 次振動モードの節の平均

Mean II : 1 次～3 次振動モードの節の平均

3.13 目標設定の限界

バントの目的は走者を次の塁に進塁させることである。そのため、バントの成否には打球速度以外にも、守備側の選手および走者のパフォーマンスが大きく関わる。そこで本論文では、バントにおけるバットとボールの衝突現象を物理的に分析するため、打者が制御できるパラメータにのみ起因する打球速度を、バントのパフォーマンスを示す尺度として採用した。

また本論文では、打者の前方から突進してくる守備側の選手の打球処理時間を延長させるため、打球速度を最小化させることをバントにおける目標と設定した。実際は打者の後方にも捕手が守備しているため、打球速度が 0 m/s であるとき、捕手にいち早く打球を処理されるため、バントとしては高く評価されない。高く評価されるバントは、前後の守備側の選手の打球処理時間を延長させるような最適な速度で打球を放ったバントである。しかし、最適な打球速度は守備側の選手のパフォーマンスによって決定するため、本論文において定めることはできなかった。そこで、バントを成功させるためには「打球を殺す」ことが重要であるとされてきたことから、前方の守備の影響を重視することが妥当であると考えられる。

本研究では、打球速度の制御が重要となる投手方向へバントを行わせた。その結果、打球速度の最小値(4.6 m/s)は 0 m/s になりえなかったことに加え、最大値(18.3 m/s)では約 1 秒でピッチングプレート(18.44 m)まで到達するほどであった。つまり、打球速度の制御が重要となる条件設定であったにも関わらず、投捕間に打球を静止させるような高く評価されるバントを、常に行うことは困難であったことを示している。すなわち、前方の守備を重視して打球速度の最小化を目標に設定したことは、バントのパフォーマンスを評価する上で妥当であったと考えられる。

第 4 章 結論

本論文の目的は、野球のバントにおける打球速度を最小化させるインパクトパラメータを明らかにすることであった。

バントの実測実験より、打球速度を規定する因子は、バットの短軸方向におけるインパクト位置である正面衝突位置からの距離、インパクト前のバット重心速度、長軸インパクト位置の 3 つであった。そしてバントの打球速度を最小化させるには、バットの短軸方向についてボールと正面衝突させ、インパクト前にバットを捕手側へ引きながら、バットの長軸方向について先端でインパクトさせればよいことが明らかとなった。打球速度を規定する因子の重要性の順序は上記の順であった。つまり、バントにおいて最も重視すべき指導は従来の「バットの芯を外し、先端でインパクトする」ことよりも「正面衝突させる」ことであると考えられる。また、バッティングとは異なる位置をグリップすることによってバットの芯である振動モードの節はグリップエンド寄りに移動するが、インパクト中にバットに加える手の力がバントの打球速度に影響を与えないことが示唆された。

参考文献

- 1) 浅見俊雄(1984) : スポーツ運動の打について. *Japanese Journal of Sports Science* 3 (3) : 178-187
- 2) 石井藤吉郎(1984) : 実戦ベースボール. 大修館書店
- 3) 上平雅史,大貫克英(1991) : 野球. ベースボールマガジン社
- 4) 香川博之,米山猛,那須英彰,五十嵐重人,北川雄二郎,高橋昌也,佐藤一孝 (2011) : 野球のバットの打撃評価システムの制作とバットの支持方法の選択. *日本機械学会論文集 C77(783)* : 258-267
- 5) 川相昌弘(2011) : スモールベースボールを紐解く. ベースボールマガジン社
- 6) 来田宣幸(2009) : 野球のバント動作におけるバットコントロール. *日本機械学会[No.09-45]シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2009 講演論文集*:224-228
- 7) 城所収二,近田彰治,矢内利政(2011) : 野球のバッティングにおける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. *バイオメカニクス研究* 15(3) : 78-86
- 8) 黒江透修(1995) : 野球. 西東社
- 9) 公認野球規則 2012
- 10) 田尾安志(1998) : 実践野球教室. 小学館
- 11) 日本野球機構オフィシャルサイト <http://bis.npb.or.jp/teams/> (2012/12)
- 12) 前田祐吉(1998) : 野球. 新星出版社
- 13) 山本清春(2000) : 野球バッティング. 西東社
- 14) Adair RK (2001) : Comment on “The sweet spot of a baseball bat,” by Rod Cross [*Am. J. Phys.* 66(9), 772–779 (1998)]. *American Journal of Physics* 69(2) : 229–230

- 15) Bahill AT, Baldwin DG (2008) : Mechanics of Baseball Pitching and Batting. *Applied Biomedical Engineering Mechanics* : 445-488
- 16) Cross R (1998) : The sweet spot of a baseball bat. *American Journal of Physics* 66(9) : 772-779
- 17) Cross R (1999) : Impact of a ball with a bat or racket. *American Journal of Physics* 67(8) : 692-702
- 18) Cross R (2001) : Response to “Comment on ‘The sweet spot of a baseball bat’ ” [Am. J. Phys. 69(2), 229–230 (2001)]. *American Journal of Physics* 69(2) : 231-232
- 19) Cross R (2004) : Center of percussion of hand-held implements. *American Journal of Physics* 72(5) : 622-63
- 20) Crisco JJ, Greenwald RM, Blume JD, Penna LH (2002) : Batting performance of wood and metal baseball bats. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34(10) : 1675-1684
- 21) McIntyre DR, Pfausch 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
- 22) Nathan AM (2000) : Dynamics of the baseball-bat collision. *American Journal of Physics* 68(11) : 979-990
- 23) Smith L (2008) : Progress in measuring the performance of baseball and softball bats. *Sports Technology* 1(6) : 291-299
- 24) Van Zandt LL (1992) : The dynamical theory of the baseball bat. *American Journal of Physics* 60(2) : 172-181
- 25) Vedula G , Sherwood JA (2004) : An Experimental and Finite Element Study of the Relationship Amongst the Sweet Spot, COP and Vibration

Nodes in Baseball Bats. *The Engineering of Sport* 5(2) : 626-632.

謝辞

本研究は、指導教員である矢内利政教授の御指導の下、行われました。科学研究の基礎に始まり実験計画や論文執筆に至るまでの全てを、常時ご多忙にも関わらず、熱心かつ丁寧に指導して頂きました。矢内教授に畏敬の念を抱きながら、2年間共に過ごせたことを誇りに思います。心より感謝申し上げます。また副査を快く引き受けてくださった川上泰雄教授、彼末一之教授には研究に関する貴重なご意見を賜りました。心より感謝申し上げます。

宮本直和先生、若原卓先生、近田彰治先生には日頃より研究に関するご意見だけでなく、激励の言葉を頂きました。心より感謝致します。

バイオメカニクス研究室のみなさんには、2年間本当にお世話になりました。実験実施から論文執筆に関する全てをサポートして頂いた城所収二さんがいなければ、この研究は成立しませんでした。感謝の意を表すと共に、今後の更なるご活躍を心よりお祈り致します。森下義隆さん、谷中拓哉さんには実験補助やデータ解釈、日頃のユーモアまでお世話になりました。共に卒業する橋本幸代さん、松本奈々ちゃん、エースこと秦野純一くん、苦しい時期を励まし合いながらも乗り越えられたことを嬉しく思います。また、学部時代を含むこの6年間に会った全ての方に感謝致します。皆様のおかげで、今日の私が存在しています。

最後に6、2年前共に私の意思を尊重し進学させてくれた両親へ。この選択が正しかったのかと苦悩したこともありましたが、正解だったと胸を張って言うための日々はこれからも続きます。が、なにより生まれてから今日まで見守ってくれたことへの感謝の気持ちを、これから少しずつカタチにし、恩返ししていきたいと思っています。

2013年2月21日 安藤義人