

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

野球打撃におけるバットを加速させるスイング技術

Swing Techniques to Accelerate the Bat-head in
Baseball Hitting

2016年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

森下 義隆

MORISHITA, Yoshitaka

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.....	4
3. 本研究の目的.....	13

第2章 バットのヘッドスピードに対する体幹および上肢のキネマティクスの貢献

1. 緒言.....	18
2. 方法.....	19
3. 結果と考察	26
4. まとめ	33

第3章 バットの運動が生み出されるメカニズム

第1節 インパクト時のバットのヘッドスピードと方位を決定する力学的要因

1. 緒言.....	49
2. 方法.....	51
3. 結果.....	59
4. 考察.....	61
5. まとめ	70

第2節 左右方向への打ち分けを可能にするスイング軌道の制御

1. 緒言.....	87
2. 方法.....	88
3. 結果.....	94
4. 考察.....	97
5. まとめ.....	102

第4章 総括論議..... 113

1. 投球されたボールを打撃する動作への一般化.....	118
2. 指導やトレーニングへの応用.....	120

第5章 結論..... 128

参考文献..... 129

謝辞..... 135

第1章 緒論

1. 序

我が国において野球は、子供から大人まで幅広い世代で親しまれており、国民にとって非常に関心の高いスポーツの1つである。野球の試合は2チームに分かれた点取りゲームであり、試合の終了時点で得点の多かったチームが勝利することができる（日本プロフェッショナル野球組織・全日本野球協会 2015）。そのため、野球の打者に要求される主たる課題の1つは、ヒットやホームランを放つことによって大量の得点を獲得することであると言える。ヒットやホームランとなる打球は、総じて高速度かつ飛距離が長いという特徴をもつ。このような打球を放つには、投手から投げられるボールをバットの先端部（バットヘッド）で「強く」、かつ「正確」に当てるという2つの課題を瞬時に行うという高度な打撃技術が求められる。つまり、野球の打者にとってこの技術を習得し、打撃技能を向上させることは、試合の勝利に貢献するために不可欠なものである。

Adair (2002) によると、野球打撃においてボールとバットの衝突時間は約 0.001 秒であり、バット間にバットは約 2.5cm しか動かないことから、衝突中に打者がバットに力を加えることによってボールに与える影響は重要視されない。この事実は、ヒットやホームランとなるような痛烈な打球を放つためには、ボール・インパクトまでにバットを最大限に加速させ、バットの運動量を大きくした状態でボールに衝突させることが重要であることを示している。スイングを開始してからインパクトまでのバットの移動距離が一定であると仮定した場合、バットのヘッド速度（ヘッドスピード）を増加させることは、スイング時間が短縮し、投球軌道を見極める決断時間を延長できると考えられる（宮西 2006）。決断時間の延長はボールをインパクトする位置をより正確に予測することができる（Breen 1967）ため、投げられたボールの中心にバットヘッドを衝突させる技能の向上にも関連するものと推察される。このように、打者にとってバットのヘッドスピードを増加させることは、打撃パフォーマンスを向上させる上で多くの利点を持つことから、打者がどのような身体運動によってバットヘッドを加速させているかを分析したキネマティクス

研究が多数行われてきた。しかしながら、これらの研究は打撃動作の詳細な観察を通して、キネマティクス的な特徴とヘッドスピードとの関連について検討している（Welch et al. 1995, 田内ら 2005, 宮西ら 2006）ものの、ヘッドスピードが、いつ、どのような身体運動によって生じているかは明らかにしていない。そのため、現状の知見だけでは現場の指導やトレーニングに活用できる具体的な方策を導くことは困難であると言える。

一方、試合における打撃パフォーマンスは、打球の良し悪し（ヒットまたはホームランになったかどうか）によって決定される。打球の良し悪しは、先述したヘッドスピードに加え、投げられたボールに対してバットをスイングさせるタイミングと、バットヘッドの空間的な位置の正確さに依存する。そのため、打撃パフォーマンスを向上させるために重要な課題は、ヘッドスピードを増大させることに加えて、バットをいかに操作するかという点に絞られてくる。打者がどのようにしてバットを移動・回転させているかを明らかにするために、スイング中の両手・バット間に作用する力を推定または計測する研究が行われてきた（平野と宮下 1983, Messier and Owen 1984, 川村ら 2000, Cross 2009, 阿江ら 2013, Milanovich and Nesbit 2014）。これらの研究は、スイング中のバットに作用した力-偶力系の変化パターンからバットのヘッドスピードと方位変化がどのようなメカニズムで生み出されているかを力学原理に則って検討している。しかしながら、算出された力-偶力系の各成分がバットのヘッドスピードと方位に対してどれだけの効果を生み出しているかは定量化されていないため、どのような力がバットの加速や方位変化に対して重要な役割を果たしているかは明らかにされていない。また、野球の試合では、状況に応じて左右方向に打球を打ち分けるという打撃技術が存在するが、打ち分けを可能にするために打者がどのような力を加えてバットの運動をコントロールしているかという詳細も明らかにされていない。

そこで、本学位論文では、熟練した打者の打撃動作を対象として、①身体の各関節運動が生み出し得るバットのヘッドスピード、および②打者の全身運動によってもたらされる力がバットのヘッドスピードと方位変化に与える効果と左右方向へ打球を打ち分けた際の

力の特徴を分析することで、野球打撃においてバットを加速・回転させるためのスイング技術を明らかにすることを目的とした。

2. 研究小史

近年、プロ野球ではセイバーメトリクスと呼ばれる統計量によって野球選手の能力を総合的に評価するという分析手法が用いられてきている。一般的に打者の評価には、打率、ホームラン、打点という指標が扱われているが、セイバーメトリクスで開発された OPS (On-base Plus Slugging) という指標 (出塁率と長打率とを加算した数値) は、これらの指標よりも得点との相関が強いということが分かってきた (鳥越 2014)。この事実は、OPS の高い選手を揃えるようにチームを編成することによって、試合に勝利する確率が向上することを意味する。OPS を構成する 2 つの数値のうち、出塁率は相手投手の制球力によって大きく左右されるものの、長打率は主に打者自身が有する打撃技能に依存するものと考えられる。長打になるような高速度かつ飛距離の長い打球を放つには、投球されたボールがホームベース付近に到達するまでの極めて短い時間にバットを加速させ、加速させたバットでボールを強く打つことが必要となる。そこで、優れた打者は如何にして身体を操作し、高速なバットスイングを生み出しているのか？また、投球コースや打球方向によって打撃動作のメカニズムは異なるのか？といった疑問が生じてくる。これらの疑問を解決するために、野球打者の打撃動作を対象にしたバイオメカニクスの分析が数多く行われてきた。

本研究小史では、A：打撃動作の基礎的なメカニズムを検討した研究、B：ヘッドスピードを増大させるために重要なキネマティクスの要因を調査した研究、C：打撃動作におけるキネティクス分析を行った研究について取り上げ、これまで明らかにされてきた野球打撃のスイング技術に関する知見についてまとめる。

A. 打撃動作の基礎的なメカニズム

野球打撃に関する研究は、古くは Slater-Hammel and Stumpner (1950, 1951) による反応時間を計測した研究まで遡る。Slater-Hammel and Stumpner は、野球経験を有する体育専攻の大学生 25 名を対象に実験を行い、野球打撃に模したボールを打つかどうか

を選択する課題においてバットをスイングさせた場合、ネオンが点灯してからスイングを開始するまでの時間（スタート反応時間）は約 0.29 秒、スイング開始からバットを 180° 水平に回転させるまでの時間（移動反応時間）は約 0.34 秒であったことを示した。1960 年代以降、打撃動作の基本的なメカニズムを調査するためにムービーカメラを用いた映像解析が盛んに行われるようになった。映像を用いて打撃動作を定量的に分析したのは Race (1961) の研究が初めてであり、プロ野球選手 17 名を対象に、打者の側方からカメラ（撮影速度 50fps）を 1 台設置して撮影が行われた。分析の結果、打者は腰部を急激に回転させてスイングを開始し、その後腰部の回転速度を上回る手首の運動によってバットを加速させていることが示された。一方、Breen (1967) は、数百人のメジャーリーガーの映像を収集し、打率が 3 割を超える優秀な打者に共通した 5 つの特徴を定性的に評価した。その共通点とは、①スイング中の身体重心が水平移動すること、②投げられたボールの軌道が見やすいように頭の位置を調整していること、③バットのスピードを大きくするために、バットを把持するボトム側上肢の肘関節をスイング開始の直前から真っ直ぐにしていること、④投手側の足部の踏出し位置が一定であること、⑤ボールをインパクトした後の上半身が打球方向を向いていることである。このうち③の特徴を有する打者は、バットのスピードが速いことに起因して一般的な打者よりもスイング時間が短く、打球されたボールを長く見ることができると、より正確なインパクトを行えることが示唆されている。Race (1961) や Breen (1967) の研究は、打者の打撃動作を側方から撮影した映像を基に分析が行われてきたが、打撃動作を正確に評価するためには鉛直軸まわりの回転運動を記述する必要があった。この問題について、McIntyre and Pfautsch (1982) は、打者の頭上にカメラを設置することで解決し、バットおよびバットを把持するボトム側上肢の第 3 中手骨、手関節、肘関節、肩関節の水平面上での運動を分析した。この研究は 20 名の大学野球選手に左右各方向に打球を打たせるという試技が分析対象であったが、どちらの動作もバットスイングが開始してから肩関節、肘関節、手関節、第 3 中手骨、バットの先端の順に最大スピードが表れた後、インパクトを迎えていることが示された。Race (1961)

や McIntyre and Pfautsch (1982) の結果から、打撃動作には、投球動作やキック動作のような身体の中心部から遠位部（末端部）に向かってセグメントの速度が順次加速されていく現象（運動連鎖：Kreighbaum and Barthels 1990, 図 1-1）が含まれることが認識され、打者はそれを利用して短時間でバットヘッドを加速させることを可能にしていると解釈されてきた。

打撃動作のメカニズムをより詳細に分析するため、Messier and Owen (1984) は、それまで主流であったカメラ 1 台の映像による 2 次元解析ではなく、同期した 2 台のカメラ映像を用いて 3 次元分析を行った。この研究では女子ソフトボール選手が実験の対象であり、定義された静止座標系から計測されたバットの速度や角速度の経時変化が初めて定量化された。その後、Welch et al. (1995) は、打者のトレーニングやリハビリテーションに役立つ知見を得るためにスイング中のバットの運動だけではなく、身体各セグメントや関節の運動についても 3 次的に記述することを試み、打撃動作のメカニズムの理解をさらに深めようとした。この研究では、プロ野球選手のティー打撃を分析し、打者はまず後足（捕手側の足）に重心を移動させながら体幹を捻り、その後前足（投手側の足）を打撃方向に踏み込み、前足に作用する地面反力によって身体を回転（右打者の場合、頭上からみて反時計まわりに回転）させていることが示された。また、身体の反時計まわりの回転において、腰部が最大の角速度を迎えた後に、肩部と上肢の角速度が最大に達していたことから、バットの最大スピードは運動連鎖によって生み出されていることが立証された。

B. ヘッドスピードを増大させるために重要なキネマティクスの要因

熟練した野球選手がどのような身体運動によってバットスイングを行っているかが明らかにされてきた一方で、打者間の打撃パフォーマンスの優劣を左右している動作要因についても多くの研究が行われてきた。バイオメカニクス分野の研究では、打撃パフォーマンスを決定する要因として力学量として評価しやすいバットのヘッドスピードが取り上げられ、特にどのような身体運動がインパクト直前のヘッドスピードと関連が強いかに関心が当て

られてきた。

田内ら（2005）は、体幹からバットまでのセグメントが順序的に運動する打撃動作において、連鎖運動の基底部となる体幹に着目し、大学野球選手 12 名のティー打撃動作から体幹の捻転動作がヘッドスピードに及ぼす影響を検討した。この研究によれば、体幹はスイングの開始前から捻転（右打者を頭上からみた場合、腰部に対して肩部が時計まわりに回転）しており、スイングが開始してから肩部よりも腰部が先行して打撃方向に回転することにより、体幹の捻転は反時計まわりに回転する（負の角速度を有する）ことになる（図 1-2）。そして、インパクト直前のヘッドスピードが速かった選手ほど体幹の負の捻転角速度が大きいことが示された。この結果は、ヘッドスピードの速い選手ほどスイング開始直後に、肩部に先立って腰部を高速に回転させていることを表している。田内らは体幹の負の捻転角速度を大きくすることは、腰部-肩部間の体幹筋群の伸長-短縮サイクル（Stretch-Shortening Cycle : SSC）を効果的に利用することができ、SSC によって肩部の捻り戻しの角加速度が高まり、間接的にヘッドスピードの増加に繋がったのではないかと推察した。打撃動作の体幹において SSC が利用されているかどうかは定かではないが、プロ野球選手 18 名におけるスイング中の筋電図を測定した研究によると、投手側の腹斜筋は、スイング局面の中でスイング開始直後が最も強く活動していることが報告されている（Shaffer 1993）。このことから、打撃動作では体幹の SSC を利用している可能性が高く、体幹が捻り戻される運動はバットヘッドの加速に貢献しているものと考えられる。

宮西（2006）は、バットヘッドのスピードがバットの角運動量と密接に関係することから、大学硬式野球部のレギュラー選手と非レギュラー選手の打撃動作における身体各部とバットの角運動量データを手掛かりに、ヘッドスピードを増加させる技術について検討した。鉛直軸まわりの角運動量に注目すると、両者とも身体の角運動量がスイング局面中期でピークに達した付近からバットの角運動量が急増していたが、レギュラー選手の方が身体の角運動量の増加が大きく、バットの角運動量の増加も大きかった（図 1-3）。宮西は、インパクト時のヘッドスピードはレギュラー選手が 35.4m/s、非レギュラー選手が

28.7m/s であったことを踏まえ、鉛直軸まわりの身体の角運動量をスイング局面中期までに増大させておくことが重要であると述べている。また、この局面においてレギュラー選手は非レギュラー選手よりも、身体の角運動量のうち体幹の角運動量の占める割合が大きいことから、身体の角運動量を増加させるためには体幹の捻り運動が最も重要であると推察している。体幹の捻り運動の重要性は、田内ら（2005）の結果を支持するものであり、以上の先行研究によって体幹の捻転動作の優劣がインパクト時のヘッドスピードの大きさを左右している可能性が示された。

野球打撃をはじめ、対象物に打具や手足を衝突させるスポーツにおいて、打具や手足の打撃面を如何に動かすかが最重要の課題となる。浅見（1984）は、打具や手足の打撃面の操作には、末端部分の関節運動が重要な役割を果たすと述べているが、両手でバットを操作する野球打撃において、左右上肢の各関節運動がバットの加速に対してどのような役割を持っているかを検討した研究は少ない。その中で、大学および社会人野球選手 16 名のティー打撃を対象に、ヘッドスピードと左右上肢の動作との関連について検討した研究がある（川村ら 2008）。この研究では、肩関節の運動は他の関節運動に比べて可動範囲が小さく、トップ側（バットを把持する両手のヘッド側）上肢の肘関節の伸展、前腕の回外、両手関節の尺屈は可動範囲が大きいことが示されている。また、可動範囲が大きかった関節とバットが同期するように運動していたことから、可動範囲の大きな関節運動がバットの加速に大きく関与していると推察されている。さらに、ヘッドスピードの最大値が大きかった打者（High 群）と小さかった打者（Low 群）で関節運動を比較した結果、High 群は Low 群よりもボトム側（バットを把持する両手のグリップエンド側）肩関節の内転と水平内転が大きかったことから、ボトム側上肢の「脇をしめる」ようにしてスイングすることがヘッドスピードを増大させる要因になることを示唆している。

上述した先行研究によって、バットの加速がどのような身体運動によってもたらされているのかが示されてきた。これらの研究は、バットのヘッドスピードと打者の運動を表すキネマティクス変量との関係を定性的、または相関係数の大きさを評価することによって

ヘッドスピードを決定する動作要因を導出しようとしたものである。しかしながら、これらの研究によって得られた結果は、算出された様々なキネマティクス変量がヘッドスピードの生成にどれだけ貢献し得るものなのかを説明することができない。どのような身体運動がどれだけヘッドスピードを生み出しているかを知ることができれば、打撃パフォーマンスを向上させるための練習やトレーニングにおいて重点を置くべきポイントがさらに明確化されると考えられる。

C. 打撃動作におけるキネティクス分析

これまでにまとめてきた研究は、主に打撃動作の現象を記述したキネマティクス分析が中心であったが、打撃動作が引き起こされる原因を議論するためにはキネティクス分析が必要となる。キネマティクス分析によって、打撃動作では身体を鉛直軸まわりに高速に回転させることがバットの加速に貢献することが示されたが、身体の回転運動がどのようにして生み出されたのかという疑問は地面反力を分析した研究が解決してくれる。身体とバットを 1 つのシステムと考えた場合、システムに作用する外力は重力と地面反力のみである。重力は鉛直下向きに作用する力であるため、システムの回転運動を生み出す原動力は打者の左右足に作用する地面反力ということになる。

システムの回転運動を引き起こす地面反力は、フォースプレートを用いて計測されてきた（平野と宮下 1983 ; Messier and Owen 1985, 1986 ; 小田ら 1991a, 1991b ; 矢内 2007）。矢内（2007）は、大学野球選手 20 名のスイング中の地面反力を計測し、踏出し足（投手側の足）がストライド直後にホームベース方向に蹴り出すことによって得られた地面反力が大きなモーメントアームをもつことによって発生したシステム重心まわりのモーメント（平均 67Nm）が、システムの回転運動に最大の貢献をしていることを示した。また、踏出し足に対して捕手方向に向かって作用する地面反力は最大の成分であったが、モーメントアームが小さいため、そのモーメントの大きさは 23Nm であったという。軸足（捕手側の足）がホームベースから遠ざかる方向に蹴り出すことによって得られた地面反

力がモーメントアームをもつことによって発生したシステム重心まわりのモーメント（平均 36Nm）は、2 番目に大きな貢献をしていた。軸足が捕手方向に蹴り出すことによって得られた地面反力によるモーメントは、モーメントアームがほぼ 0 であったことから、システムの回転運動には貢献していなかった。以上の結果から、打撃動作における身体の回転運動は、主に踏出し足が投手方向への並進運動にブレーキをかけながらも、ホームベース方向に蹴り出すことによって得られた地面反力に起因したシステム重心まわりのモーメントによって生み出されていることを示した。また、矢内（2007）は、バットのヘッドスピードを決定する力学的要因を分析するために、ヘッドスピードを成果（Result）とし、それをもたらす要因（Factors）との関係を示す **Deterministic model**（Hay and Reid 1988）を作成した（図 1-4）。このモデルは、ある成果とそれを決定する様々な要因との関係を力学的または数学的根拠で確定的に説明することができるため、ヘッドスピードに影響をもたらす力学的根源を導き出すのに役立つとしている（矢内 2007）。矢内は、作成した **Deterministic model** に基づいて先述した地面反力データと宮西（2006）のデータを統合し、インパクト時のヘッドスピードは、打者の踏出し足がシステムの投手方向への並進運動にブレーキをかけつつホームベース方向に地面を押し、軸足がホームベースから離れる方向に地面を押しという、左右非対称な下肢動作の反作用となる地面反力がシステム重心まわりのモーメントを生み出し、その結果として得られたシステム全体の角運動量が、両手-バット間に作用する内力によってバットに伝達されるというメカニズムで獲得されることを示した。

宮西（2006）や矢内（2007）によって、バットを加速させるための身体の回転運動のメカニズムについての理解が進んできたが、地面反力のモーメントによって得られたシステムの角運動量をバットに伝達する両手-バット間の内力（バットに作用している力）に着目した研究もいくつか行われてきた。この背景には、打撃動作は投手から投げられる様々なボールに対して、時間的制約下で正確な位置にバットヘッドを移動させることが要求されるため、打者がどのような力によってバットをコントロールしているかに関心が集まった

ためであると考えられる。打者は両手でバットを把持しているため、バットの運動に対して両手のどちらがその運動に影響を及ぼしたかどうかをバット重心の加速度や角加速度から判別することは困難である。平野と宮下（1983）は、この問題に対して力の作用点をグリップエンドの 1 点であると仮定してモデリングすることで両手部がバットに加えた力を算出した。そして、バット重心の並進と回転の運動方程式を解くこと（逆動力学演算）によってバットに作用した合力と偶力（トルク）を算出した。この研究の被験者は大学野球選手 1 名であったが、スイング開始直後はバットを投手方向に引き抜く合力が加わり、インパクト直前ではバットを後方（打者の背中側）に引く合力と打撃方向へバットを回転させる偶力が加わっていることを示した。他方で、川村ら（2000）は大学生および社会人野球選手 10 名にティー打撃を行わせ、平野と宮下（1983）の研究と同様の方法を用いて、打者の両手がバットに加えた力を推定した。合力が作用する方向は平野と宮下（1983）が報告したものと類似していたが、偶力はスイング開始からバットを加速させる方向に作用していたが、インパクト直前からはバットを減速させるように作用することを示した。両研究結果の違いは、平野と宮下（1983）は撮影速度が 100fps であったのに対して、川村ら（2000）はその倍の撮影速度（200fps）であったことに起因していると推察される。高速なバットのスイング運動を考慮すると、データのサンプリングレートの高い川村らの方がより精緻で妥当な結果が算出されていると考えられる。Cross（2009）と Milanovich and Nesbit（2014）も逆動力学演算によりスイング中のバットに作用する力の推定を試みており、打者の両手がバットに加えた合力や偶力を、バットの運動によって変化する移動座標系について記述している。ここで用いられている移動座標系は、曲線軌道で移動するバット重心またはグリップエンドに対して曲線の向心方向と接線方向、およびそれらを外積した方向（スイング成分）によって定義されている。この座標系からみた合力と偶力は、合力の向心成分と接線成分はバットの加速に同期して増加していくが、インパクトが近づくにつれ、向心成分は増加し続けるが、接線成分は減少するという。また、偶力のスイング成分は、スイングが開始されてから徐々に増加するが、インパクト直前から減少し始め、

打撃方向へのバットの回転を抑制するようにしてインパクトを迎えている打者が存在することを報告した。

上述した研究は全て、打者の両手部がバットに加えた全ての力を同値の力-偶力系（1 つの合力と 1 つの偶力）としてモデリングしたものである。このモデルの限界は、左右各手がそれぞれバットにどのような力と偶力を加えているかを個別に評価できないことが課題であったが、小池（2004）はバットのグリップ部にひずみゲージを貼付したセンサー・バットを開発することにより、左右各手に作用する合力と偶力を直接計測することを可能にした。センサー・バットが開発されたことにより、左右上肢の各関節のキネティクス分析（阿江ら 2013, 2014）や、バットのヘッドスピードやコントロールに対する各関節の発揮トルク、肩関節力、遠心力やコリオリ力などの運動依存項、および重力の貢献を定量化する研究（小池ら 2008, 2009）が行われるようになった。これらの研究は、統計的な分析ではなく、バットの運動に対する入力の影響度を定量化できるため、バットが加速されるメカニズムの個人差や技能差を詳細に検討できると考えられる。しかしながら、センサー・バットによって出力されるキネティクス量の妥当性の検証は、低強度での素振りを行った際のバット座標を用いた逆動力学演算によって得られるキネティクス量との比較（小池 2010）しか行われていない。また、多くの打者を観察するとバットを把持する左右各手は互いに接触していることが多く、スイング中に手部同士が干渉し合うため、センサー・バットによって左右各手を完全に独立した状態で計測が行えているかは疑問が残る。

3. 本研究の目的

野球打撃においてヒットやホームランとなる痛烈な打球を放つことは、試合の勝利に直結する。このような打球を放つために、これまで行われてきた研究では、どのような身体運動がバットのヘッドスピードと関連が強いのか、またバットの運動がどのような力によって制御されているのかが検討されてきた。しかしながら、先行研究はバットのヘッドスピードや方位変化に対してそれらを生み出す要因となるパラメータがどの程度貢献しているかを定量化していないため、指導の現場において打撃のパフォーマンス向上に繋がる具体的な方策を提示することが困難であると考えられる。

そこで本学位論文は、①身体各関節運動が生み出し得るバットのヘッドスピード、および②打者の全身運動によってもたらされる力がバットのヘッドスピードと方位変化に与える効果と左右方向へ打ち分けた際の力の特徴を分析することで、熟練した野球打者がどのようなメカニズムでバットを加速・回転させているかを明らかにすることを目的とした。

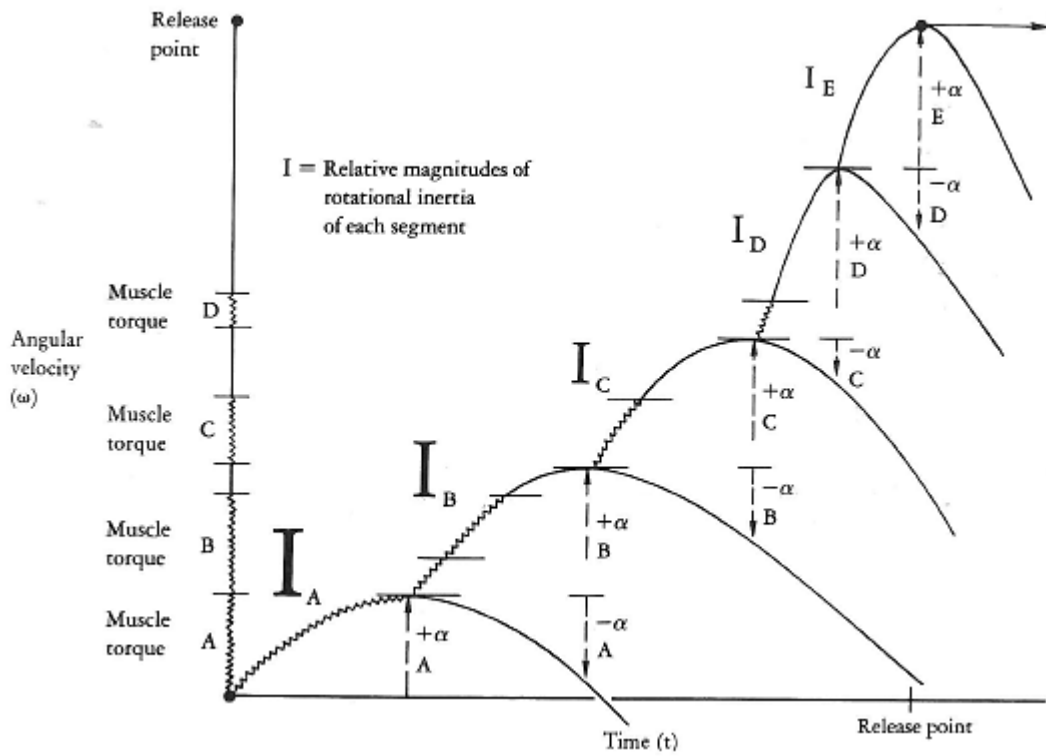


図 1-1 運動連鎖の原理の概念図。運動連鎖が生じるには、中心部から末端部に向かって慣性モーメント I が小さくなり、中心部の方が大きな筋トルクを発揮できることが前提条件となる。（Kreighbaum and Barthels 1990 より引用）

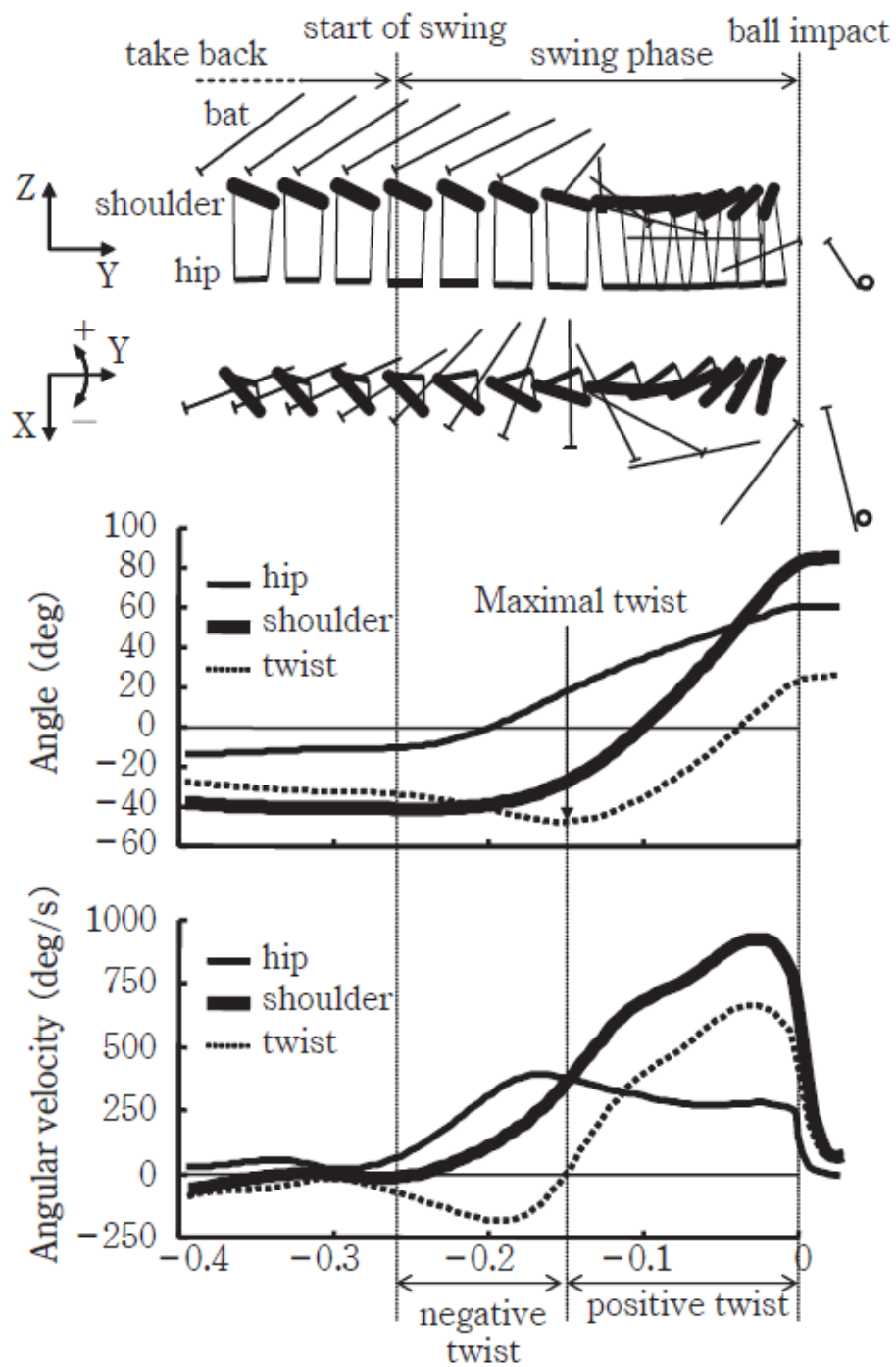


図 1-2 スイング局面における腰部，肩部，捻転の角度と角速度変化の典型例。（田内 2005 より引用）

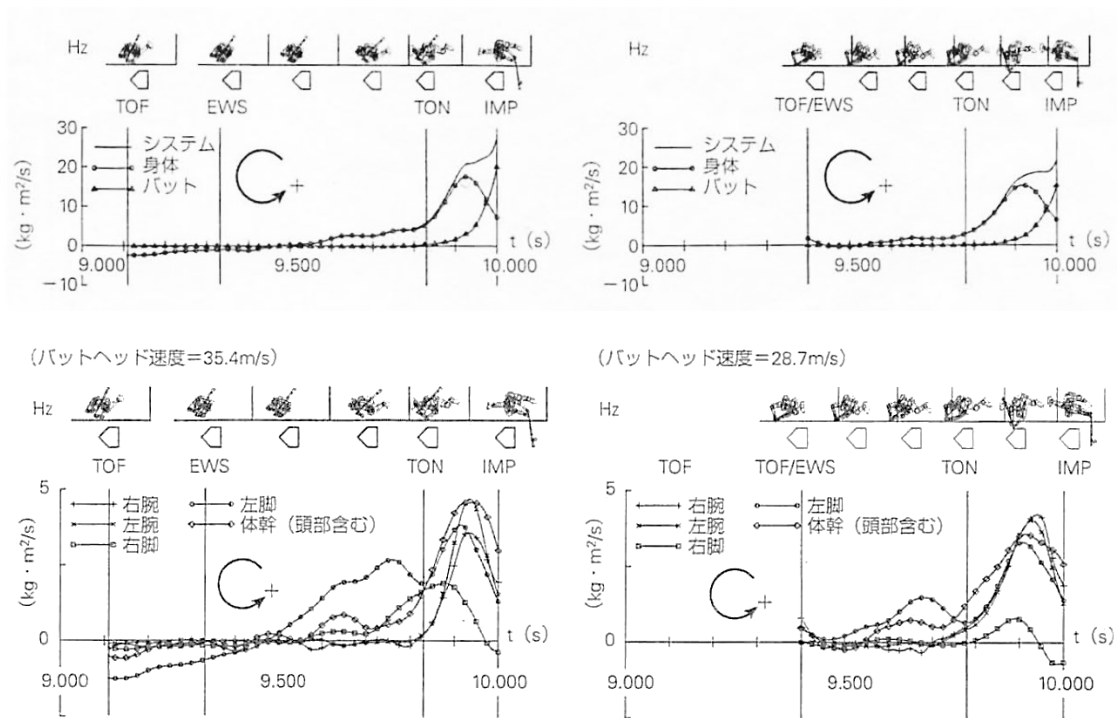


図 1-3 レギュラー選手（左列）と非レギュラー選手（右列）におけるシステム（身体 + バット：上段）と身体 5 部位（下段）の鉛直軸まわりの角運動量変化。（宮西 2006 より引用）

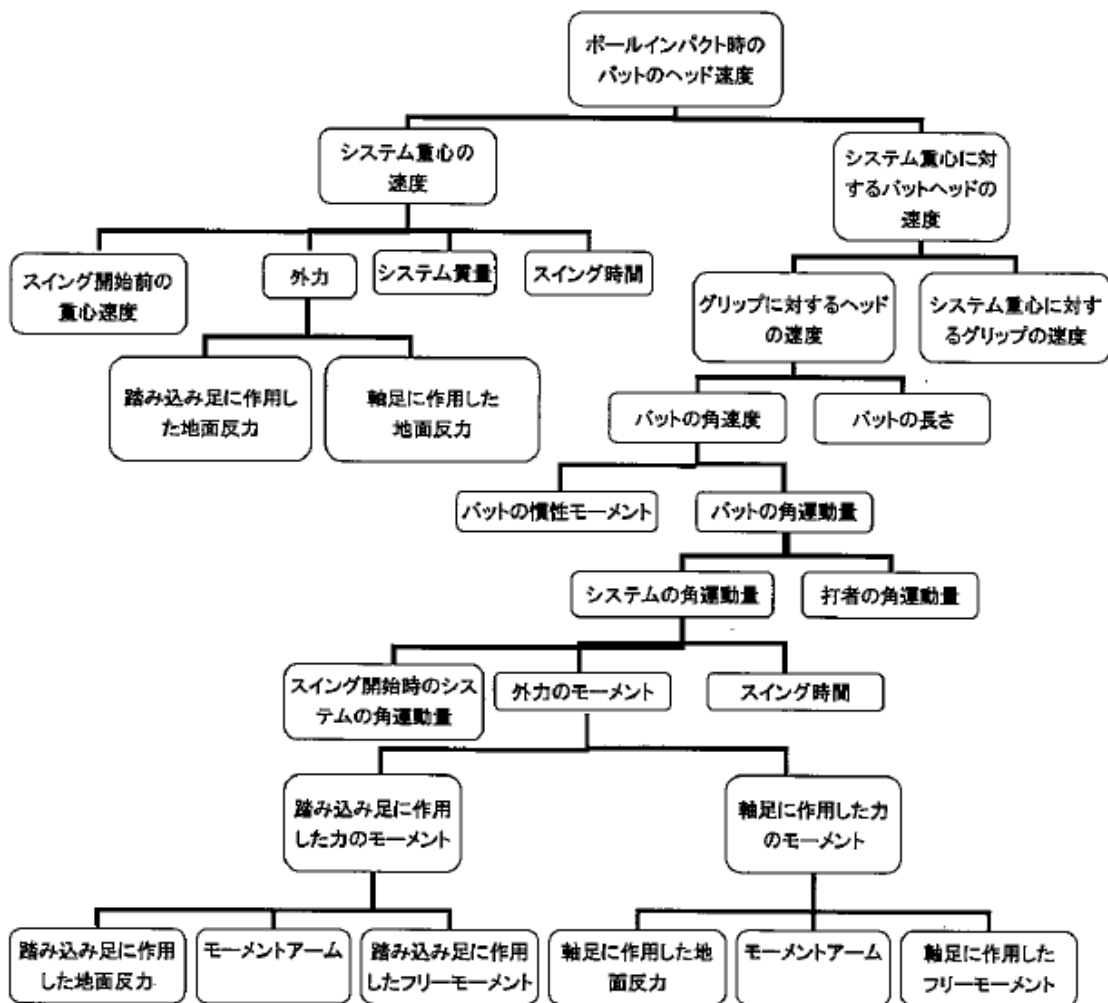


図 1-4 ボール・インパクト時のバットのヘッドスピードを決定する要因. モデル右側第 3 段のインパクト時におけるグリップに対するヘッドの速度は、地面反力のモーメントによって生み出されたシステム全体の角運動量が、両手-バット間に作用する内力によって伝達し、その結果としてバットが角運動量を有することによって生み出されるというメカニズムを示す。(矢内 2007 より引用)

第2章 バットのヘッドスピードに対する体幹および上肢のキネマティクスの貢献

1. 緒言

野球のバッティングにおいて鋭い打球を放つには、打者は投手がボールを投じてからインパクトまでの極めて短い時間でバットを加速させ、ボールが衝突する部分（バットの芯付近）の速度を増加させることと、最適なタイミングでバットの芯をボールの軌道に合わせ、正確にボールを打ち返すという2つの技術が求められる。これまで行われてきた研究は前者に着目したものが多く、バットを加速させ大きなバット速度を獲得するためには、体幹の長軸まわりに腰部、肩部、上肢の各セグメントを順次投手方向へ回転させること（Welch et al. 1995）、体幹の捻転の捻り戻しの角加速度を高めること（田内ら 2005）、身体の鉛直軸まわりの角運動量を増加させること（宮西 2006）などが重要であることを明らかにしてきた。これらの研究は全て、バッティング動作のキネマティクスの特徴を定量化し、それらの特徴とバット速度との関係を明らかにしたものである。しかしながら、先行研究で算出されている様々なキネマティクスの変量は、バット速度の生成にどの程度の影響を及ぼしているかを直接説明するものではない。そのため、野球のバッティングにおいて身体各部の運動がバット速度の生成にどれだけ貢献するかは明らかになっていない。

身体や道具の先端部を加速させる運動において、先端部となる手先や道具の速度に対して身体各部の回転運動がどれだけ貢献しているのかについて幾つかの研究が行われてきた（Sprigings et al. 1994, Elliott et al. 1995, 宮西ら 1996, Gordon and Dapena 2006, Tanabe and Ito 2007）。Sprigings et al. (1994) は、テニスのサーブ動作において、上肢の各セグメントの回転運動が生じさせ得るラケットのヘッドスピードを3次元的に算出する方法を考案し、インパクト直前のヘッドスピードは、主に肩関節の内旋と水平内転、手関節の掌屈、前腕の回内、および肩関節の前方方向への速度によって生成されていることを定量的に示した。また、宮西ら (1996) は野球の投球動作において、Sprigings et al. (1994) と同様の方法を用いて、ボール速度に対する体幹および投球腕の各関節の回転運動が生じさせ得るボール速度の割合を貢献度 (%) として算出している。これらの研究に

よって、テニスサーブや投球の動作においては、先端部の速度に対して体幹や上肢各関節の回転運動が生み出す速度の経時的な変化が明らかにされてきた。

Springs et al. (1994) が考案した方法の特徴は、身体の解剖学的な関節角速度とそれぞれの関節点と先端部とを結ぶベクトルとの外積によって、各関節の回転運動が生成し得る先端部の速度をキネマティック的に求めた点にある。この方法をバッティング動作に応用し、身体各部を連結する関節の回転運動が生成し得るバットのヘッドスピードを知ることとは、バッティング動作のメカニズムを探るための基礎的な知見として役立つと考えられる。また、指導現場において選手が意識して練習すべきポイントがより明確になり、バッティングのパフォーマンス向上に繋がるものと考えられる。そこで本章では、Springs et al. (1994) と同様の方法を用いて、バッティングにおける体幹からバットを連結する関節の回転運動が生成し得るヘッドスピードを定量化し、算出した値を用いてインパクトの瞬間のヘッドスピードを増加させるために必要なキネマティクスの要因について検討を行った。

2. 方法

2.1 被験者

大学野球 1 部リーグに所属する選手 17 名を対象に実験を行った。被験者の身長は $1.74 \pm 0.04\text{m}$ 、体重は $71.1 \pm 6.6\text{kg}$ であり、このうち右打者が 8 名、左打者が 9 名であった。本実験は、国立スポーツ科学センターの倫理審査委員会の承認を得た上で実施した。実験に先立ち、被験者には本研究の目的、実験方法および実験に伴う危険性などを説明し、書面によって実験参加に対する同意を得た。

2.2 剛体リンクモデルの定義

打者の体幹、上肢およびバットの運動連鎖を分析するため、骨盤を基底部として、先端に向けて胸郭、肩甲帯、上肢、バットの順に連結する剛体リンクモデルを定義した（図 2-

1) . 上肢は、一般に複数の身体部位が複数の関節で連結された二組の運動連鎖と見なされるが、野球の打撃動作においては一組の閉鎖型運動連鎖として機能する（小池 2004）. しかしながら、本章ではこの閉鎖型運動連鎖を形成する左右上肢セグメントの運動やそれらを連結する関節運動には着目せず、上肢全体が肩甲帯に対して移動・回転したことに起因するヘッド速度成分に着目することとした. そのため、上肢は左右の手部・前腕・上腕に分離せず、肩甲帯とバットを連結する 1 つの剛体として単純化することとした.

骨盤は左右の上前腸骨棘（LAS, RAS）と上後腸骨棘（LPS, RPS）の 4 点、胸郭は頸切痕（IJ）, 第 7 頸椎棘突起（C7）, 剣状突起（PX）, 第 8 胸椎棘突起（T8）の 4 点、肩甲帯は左右の肩峰（LAC, RAC）の 2 点、上肢は LAC, RAC, グリップエンド（GE）の 3 点、バットは GE, バットヘッド（BH）, バット中間点（M1, M2）の 4 点から定義した（図 2-2）. 各セグメントの連結部は、下胴関節（LTJ）, 上胴関節（UTJ）, 肩関節（SJ）, 手関節（WJ）とし、全て球関節で構成される自由度 3 の関節と仮定した. なお、連鎖運動の基底部となる骨盤中心（P）は左右の上前腸骨棘の midpoint と左右の上後腸骨棘の midpoint とを結んだ線の midpoint、LTJ は剣状突起と第 8 胸椎棘突起の midpoint、UTJ は頸切痕と第 7 頸椎棘突起の midpoint と PX と T8 の midpoint とを結んだ線に IJ から下ろした垂線との交点、SJ は左右の肩峰を結んだ線の midpoint とした.

2.3 データ採取と処理

実験は屋内にある全天候舗装の実験場にて行った. 被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、ティースタンドを用いたバッティングを行わせた. ティースタンドの前後、左右位置は被験者に任意で設定させ、高低は上前腸骨棘の高さに設定した. また、ティースタンドの約 5m 前方に防球ネットを設置した. 各被験者には、ライナー性の打球を試合と同様のバッティングフォームでセンター方向に最大努力で打つように教示し、試技後に 5 段階で自己評価を行わせた. 打球がセンターラインを中心に左右 15 度以内に放たれ、かつ自己評価が最も高い試技（5 段階中の 5 点）を成功試技とした. 実験は成功試技

が各被験者 3 試技得られるまで継続した。成功試技を 3 試技収集するまでに要した試行数は 5 ± 2 回（平均値 \pm 標準偏差）であった。

実験試技は、光学式 3 次元動作分析装置（VICON MX, Oxford Metrics 社製）を用いて、被験者の身体表面、バットおよびボールに貼付した反射マーカの 3 次元座標を計測した。記録には専用カメラを 13 台使用し、サンプリング周波数は 500Hz に設定した。身体各セグメントとバットの位置と方位を表す移動座標系を定義するために、前項で示した標認点に反射マーカを計 14 点貼付した（図 2-2）。また、踏出し足（右打者の場合は左足）の接地時刻と、ボールとバットのインパクト時刻を確認するため、両足のつま先と踵に計 4 点、ボール表面上にも 2 点反射マーカを取り付けた。このとき、身体表面とバット両中間点には直径 14mm の球形の反射マーカを、BH と GE およびボール表面には直径がそれぞれ 20mm と 10mm の半球形の反射マーカを用いた。成功試技のうち、インパクト直前のバットヘッドの合成速度（ヘッドスピード）が最も大きい試技を分析対象とした。ヘッドスピードはインパクト直前の 5 フレームを平均した値を用いた。既知のバット長に対してインパクト直前 170 フレーム間において計測されたバット長の二乗平均誤差は 2mm 以下であった。

実験から得られた 3 次元座標値は、Yu et al. (1999) の方法を用いて最適遮断周波数を決定（42.4~62.4Hz）し、4 次のバターース型ローパスデジタルフィルタによって平滑化した（Winter 1990）。なお、野球の打撃動作ではインパクトの衝撃によってインパクト後のバットヘッドは急激に減速するため、このようなデータをそのまま平滑化するとインパクト前後の座標値に歪みが生じる。したがって、バットヘッドの座標値についてはインパクト直前の座標値を基準に点対称に回転させたデータをインパクト後の座標値として仮想的に追加した上で平滑化を行った。また、左打者のデータは座標値を反転させ、全て右打者が打ったものとして分析した。

2.4 座標系の定義

本章ではホームプレートの捕手側の頂点を原点とし、投手方向を Y 軸、Y 軸に垂直で右打席から左打席へ方向を X 軸、鉛直上方向を Z 軸とする右手直交座標系 R_G を設定し、基準座標系として用いた。 R_G について計測された 3 次元座標値を用いて、各セグメントに固定された移動座標系 (R_P, R_T, R_S, R_U, R_B) を定義した (図 2-3)。骨盤座標系 R_P は LAS から RAS へ向かうベクトルを X_P とし、 X_P と、LPS と RPS の中点から LAS と RAS の中点に向かうベクトルとの外積から Z_P を、 Z_P と X_P との外積から Y_P を算出した。胸郭座標系 R_T は PX と T8 の中点から IJ と C7 の中点に向かうベクトルを Z_T とし、 Z_T と、C7 から IJ に向かうベクトルと T8 から C7 に向かうベクトルとの外積から算出されるベクトルとの外積から Y_T を、 Y_T と Z_T との外積から X_T を算出した。肩甲骨座標系 R_S は LAC から RAC に向かうベクトルを X_S とし、 R_T の Z_T と X_S との外積から Y_S を、 X_S と Y_S との外積から Z_S を算出した。上肢座標系 R_U は LAC と RAC の中点から GE に向かうベクトルを Y_U とし、 R_S の X_S と Y_U との外積から Z_U を、 Y_U と Z_U との外積から X_U を算出した。バット座標系 R_B は GE から BH に向かうベクトルを Z_B とし、 Z_B と M1 から M2 に向かうベクトルとの外積から Y_B を、 Y_B と Z_B との外積から X_B を算出した。

2.5 各関節の回転運動が生じさせ得るヘッドスピードの導出

Springs et al. (1994) の方法に基づき、バッティング動作における骨盤の並進・回転運動および各関節の回転運動が生じさせ得るヘッドスピードを算出するための基本式を導出する。図 2-1 に定義した剛体リンクモデルを用いて、骨盤からバットまでの運動を開リンク連鎖機構 (open kinematic chain) として考えると、任意の瞬間のヘッドスピードは以下に示す骨盤の並進速度と隣接するセグメント間の相対速度の総和として求めることができる。

$$V_{BH} = V_P + V_{LTJ/P} + V_{UTJ/LTJ} + V_{SJ/UTJ} + V_{WJ/SJ} + V_{BH/WJ} \quad (1)$$

V はスピード (速度の大きさ) を示しており、例えば $V_{LTJ/P}$ は骨盤中心 (P) に対する下胴

関節 (LTJ) の相対速度を意味する。なお、 V_P は骨盤より下部の運動によって生じたスピードである。式 (1) において、右辺の各項を各セグメントの角速度を用いて表すと、

$$V_{BH} = V_P + \omega_P \times r_{LTJ/P} + \omega_T \times r_{UTJ/LTJ} + \omega_S \times r_{SJ/UTJ} + \omega_U \times r_{WJ/SJ} + \omega_B \times r_{BH/WJ} \quad (2)$$

となる。 ω は基準座標系からみた各セグメントの角速度、 r は添字の 2 点を結ぶ相対位置ベクトルを示しており、例えば $r_{LTJ/P}$ は骨盤中心 (P) に対する下脛関節 (LTJ) の位置を意味する。各セグメントの角速度は、移動座標系 R_P , R_T , R_S , R_U , R_B の各軸方向の単位ベクトルを時間について微分することによって算出した。式 (2) の相対位置ベクトルは、各関節とバットヘッドを結ぶベクトルを用いると以下のように表すことができる。

$$r_{LTJ/P} = r_{BH/P} - r_{BH/LTJ} \quad (3)$$

$$r_{UTJ/LTJ} = r_{BH/LTJ} - r_{BH/UTJ} \quad (4)$$

$$r_{SJ/UTJ} = r_{BH/UTJ} - r_{BH/SJ} \quad (5)$$

$$r_{WJ/SJ} = r_{BH/SJ} - r_{BH/WJ} \quad (6)$$

式 (3) ~ (6) を式 (2) に代入すると、

$$V_{BH} = V_P + \omega_P \times (r_{BH/P} - r_{BH/LTJ}) + \omega_T \times (r_{BH/LTJ} - r_{BH/UTJ}) + \omega_S \times (r_{BH/UTJ} - r_{BH/SJ}) + \omega_U \times (r_{BH/SJ} - r_{BH/WJ}) + \omega_B \times r_{BH/WJ} \quad (7)$$

$$V_{BH} = V_P + \omega_P \times r_{BH/P} + \underbrace{(\omega_T - \omega_P)}_{\omega_{LTJ}} \times r_{BH/LTJ} + \underbrace{(\omega_S - \omega_T)}_{\omega_{UTJ}} \times r_{BH/UTJ} + \underbrace{(\omega_U - \omega_S)}_{\omega_{SJ}} \times r_{BH/SJ} + \underbrace{(\omega_B - \omega_U)}_{\omega_{WJ}} \times r_{BH/WJ} \quad (8)$$

となる。式 (8) のカッコ内は各関節を介して連結する近位セグメントに対する遠位セグメントの角速度 (関節角速度) を示しており、以下のようにまとめることができる。

$$V_{BH} = V_P + \underbrace{\omega_P \times r_{BH/P}}_{V_{\omega P}} + \underbrace{\omega_{LTJ} \times r_{BH/LTJ}}_{V_{\omega LTJ}} + \underbrace{\omega_{UTJ} \times r_{BH/UTJ}}_{V_{\omega UTJ}} + \underbrace{\omega_{SJ} \times r_{BH/SJ}}_{V_{\omega SJ}} + \underbrace{\omega_{WJ} \times r_{BH/WJ}}_{V_{\omega WJ}} \quad (9)$$

式 (9) は、任意の瞬間のヘッドスピードをその瞬間の①骨盤中心のスピード V_P 、②骨

盤の回転が骨盤以遠の身体部位全体（胸郭，肩甲帯，上肢，バット）を同姿勢のまま移動・回転させたと仮定した場合に生じさせ得るヘッドスピード $V_{\omega P}$ ，③骨盤以外の各セグメントがその近位に連結するセグメントに対して回転した場合に（そのセグメント以遠の身体部位全体を同姿勢のまま移動・回転させたと仮定して），その相対角速度（各関節の角速度）が生じさせ得るヘッドスピードの和（ $V_{\omega LTJ} + V_{\omega UTJ} + V_{\omega SJ} + V_{\omega WJ}$ ）とみなして表したものである。

本章では，式（9）に実測した各セグメントの位置と角速度を入力値としてヘッド速度を算出し，ヘッドスピードを構成する各要素（ V_P ， $V_{\omega P}$ ， $V_{\omega LTJ}$ ， $V_{\omega UTJ}$ ， $V_{\omega SJ}$ ， $V_{\omega WJ}$ ）をバットヘッドの速度ベクトルにそれぞれ投影することによって，任意の瞬間の各関節の回転運動が生じさせ得るヘッドスピードを求めた。また，このヘッド速度における全被験者の特徴を抽出するために，踏出し足の接地からインパクト直前までの時間（スイング局面）を 100% SP（percent swing phase）と定義し，算出したデータを 3 次のスプライン関数を用いて補間することによって規格化した。踏出し足の接地時刻は，踏出し足が離地した後，再び接地する時期において，つま先に貼付した反射マーカの速度の大きさが 1m/s 未満になった時点と定義した。また，インパクト直前の時刻はボールが最初に移動したフレームの 1 コマ前とし，動作分析装置のソフトウェア上に表示される反射マーカの 3 次元座標を視認して判断した。

2.6 Deterministic model の作成

本章ではヘッドスピードを増加させるキネマティクスの要因を分析するために，インパクト直前のヘッドスピードとヘッドスピードを構成する各要素（ V_P ， $V_{\omega P}$ ， $V_{\omega LTJ}$ ， $V_{\omega UTJ}$ ， $V_{\omega SJ}$ ， $V_{\omega WJ}$ ）との関係を Deterministic model（Hay and Reid 1988）を用いて表すことにした。以下に示すモデル作成において，スイング局面を 3 つ（始動期，前期，後期）に分割することとし，始動期は踏出し足のつま先接地（SFC）から同足の踵接地（HC）まで，前期は HC から水平面に投影したバットの長軸が基準座標系の Y 軸と平行になった時点

(MID) まで、後期は MID からインパクト直前 (BI) までと定義した (表 2-1) . HC の時刻は前項で説明した SFC の時刻と同様の方法で決定した.

上記の定義を用いると BI のヘッドスピード (1st level) は, SFC におけるヘッドスピードと 3 つの局面におけるヘッドスピードの変化の和によって表すことができる (2nd level) . また, 2nd level の各項目はヘッドスピードを構成する各要素 (V_P , $V_{\omega P}$, $V_{\omega LTJ}$, $V_{\omega UTJ}$, $V_{\omega SJ}$, $V_{\omega WJ}$) によって生じさせ得るヘッドスピードの変化の和によって説明することができる (3rd level) . これらの関係を Deterministic model で表すと図 2-4 のようになる.

2.7 統計処理

本章で定義した剛体リンクモデルを用いて打者の身体を単純化した方法論の妥当性を検証するため, バットヘッド座標を時間微分して算出したヘッドスピード (計測値) の時系列データと式 (9) から得られたヘッドスピード (算出値) との時系列データの間を各試技について相互相関係数を用いて検討した. また, 各試技について計測されたインパクト直前のヘッドスピードとそれに対応する算出値との差について対応ありの t 検定を用いて検定した. さらに, 両データの一致性を確認するため, 両データの散布図から得られる回帰直線の傾きと Identical line の傾きとの差の検定を行った. これらの統計処理の有意水準は 5%未満とした.

インパクト直前におけるヘッドスピードの被験者間差を説明する要因について検討するため, Deterministic model の 1st level (インパクト直前のヘッドスピード) と 2nd level (各局面のヘッドスピード変化) との関係についてピアソンの積率相関係数を用いて有意性の検定を行った. また, 有意な相関が認められた局面については, 1st level と 3rd level (各関節の回転運動によって生じさせ得るヘッドスピード変化) との相関関係についても有意性の検定を行った. 相関分析における有意水準は 10%未満に設定した.

3. 結果と考察

3.1 方法論の妥当性

ヘッドスピード（時系列データ）の計測値と剛体リンクモデルを用いた算出値との相互相関係数は、全被験者の試技について 0.998 以上であり（図 2-5），両データ間には高い類似性が確認された。また，両データの回帰直線の傾きは 1.033 ± 0.019 ，切片は -0.575 ± 0.242 であり，回帰直線の傾きと Identical line の傾きとを比較した結果，有意差が認められたのは僅か 2 試技であった。一方，両データのインパクト直前の値は有意な差が認められた（計測値： $34.5 \pm 1.7\text{m/s}$ ，算出値： $35.2 \pm 1.7\text{m/s}$ ， $p < 0.05$ ）が，その差は 1.0%（ 0.7m/s ）であった。時系列データについては，80%SP を過ぎてから両データ間の一致性が最大で約 4%低下した（図 2-5）が，この原因は伸縮する両上肢を剛体としてモデル化したことや，貼付した反射マーカの計測誤差などが影響していると考えられる。実際，上肢セグメントを表すベクトル（ $r_{WJ/SJ}$ ）の長さは 0~100%SP において，平均で $0.07 \pm 0.02\text{m}$ （ $0.42 \sim 0.49\text{m}$ ），すなわち上肢長が約 10%変化していた。しかし，この長さの変化によるヘッドスピードへの影響の大きさをみるために，肩関節に対する手関節の速度（ $|\omega_U||r_{WJ/SJ}|\sin\theta$ ）において $|r_{WJ/SJ}|$ を一定（ 0.42m ， 0.49m ）として計算したところ，その差は最大でも 1.5m/s （13.9%）であった。以上のことから，算出値は計測値の変化をほぼ正確に記述できていると判断できるため，本章で定義したモデリングは妥当なものであったと言える。

3.2 各関節の回転運動が生み出したヘッド速度

ヘッドスピード（ $= V_p (\approx 0) + V_{\omega P} + V_{\omega LTJ} + V_{\omega UTJ} + V_{\omega SJ} + V_{\omega WJ}$ ）は 50%SP 付近から急激に増加し，インパクト付近で最大となった（図 2-6）。体幹の各関節の回転運動が生み出したヘッドスピードの和（ $= V_p (\approx 0) + V_{\omega P} + V_{\omega LTJ} + V_{\omega UTJ}$ ）は，インパクト付近（95%SP）まで一貫して上昇しており，50%SP 付近まではヘッドスピードと同等の値を示した。しかし，その時点を過ぎてからはヘッドスピードとの差が急激に広がり，インパ

クト付近ではヘッドスピードの半分以下の大きさとなった。一方、体幹の各関節の回転運動によって生み出したヘッドスピードの和に肩関節の回転運動が生み出したヘッドスピードを加算すると ($= V_P (\approx 0) + V_{\omega P} + V_{\omega LTJ} + V_{\omega UTJ} + V_{\omega SJ}$) , その値は 85%SP 付近から減少するという結果が示された。

各関節の回転運動が生み出したヘッドスピードを表した結果 (図 2-7) , 手関節の回転運動が生じさせたヘッドスピード ($V_{\omega WJ}$: つまり, 上肢に対するバットの相対的な回転運動が生み出し得る任意の瞬間のヘッド速度方向への成分) は 70%SP 以降に全ての関節運動の中で最も大きな値を示し, インパクト時には 27.3m/s に達することが示された。この大きさはインパクト直前のヘッドスピード (35.2m/s) の 78%に相当する。下腕関節の回転運動によるスピード ($V_{\omega LTJ}$) は 25%SP 付近まで負の値であったが, それ以降は増加し, インパクト直前では手関節の回転運動に次いで大きな値 (4.6m/s) を示した。骨盤の回転運動によるスピード ($V_{\omega P}$) はインパクトまで徐々に増加し, インパクト直前には下腕関節の回転運動と同等の値 (4.6m/s) を示した。上腕関節の回転運動と骨盤の並進運動によるスピード ($V_{\omega UTJ}$, V_P) は, とともに踏出し足接地時から小さな値を維持し, インパクト直前ではそれぞれ 1.7, 0.2m/s であった。また, 踏出し足接地時から 30%SP 付近まではほぼ 0m/s であった肩関節の回転運動によるスピード ($V_{\omega SJ}$) は, 30%SP から徐々に増加し 2.5m/s の最高値を記録したが, 75%SP 付近から減少し, インパクト直前には負の値 (-3.2m/s) を示した。インパクト直前に肩関節の回転運動によるヘッドスピードが負の値を示したことは, このスピードを構成する $\omega_{SJ} \times r_{BH/SJ}$ の Y 成分 ($= \omega_Z r_X - \omega_X r_Z$: X, Z は基準座標系における各成分を示す) が負の値を示していたことを意味する。また, インパクト直前の $r_{BH/SJ}$ の X 成分が正の値で絶対値がほぼバット長に等しく (約 0.8m) , Z 成分が負の値で絶対値は肩関節とバットヘッドとの高低差 (約 0.4m) となることから, 肩関節角速度 (ω_{SJ}) の X 成分と Z 成分の両方, またはいずれか一方が負の値となることに起因すると考えられる。実際, 計測された肩関節角速度の X 成分は負の値で, インパクトに近づくにつれその絶対値が増加していた (図 2-8) 。これに対し, Z 成分は正の値で, イン

パクトに近づくとつれ減速・停止していた。また、75～100%SP の上肢と肩甲帯の角速度の X 成分は、それぞれ 5.7rad/s から -1.5rad/s と 5.5rad/s から 5.2rad/s に変化していた。つまり、肩関節の回転運動によるヘッドスピードがインパクト直前に負の値を示した原因は、上肢の角速度 (ω_U) の X 成分が減速・停止していたことと同期して、肩甲帯の角速度 (ω_S) の X 成分が正方向に回転したこと（肩甲帯が捕手側に傾く回転をした）により、肩甲帯に対して上肢が前まわり方向（X 軸の負の方向）に回転したことが原因であったと考えられる。以上の結果より、0～50%SP においては体幹の各関節の回転運動がヘッドスピードの大部分を生み出し、50～100%SP においては手関節の回転運動がヘッドスピードを急激に増加させた結果、インパクト直前では手関節の回転運動がヘッドスピードの 70%以上を生成し、骨盤と体幹の関節（下胴関節，上胴関節）の回転運動が残りの約 30%を生成することが明らかとなった。

Welch et al. (1995) は、プロ野球選手にティースタンドを用いたバッティングを行わせ、身体各セグメントとバットの回転運動を分析した結果、踏出し足接地からインパクトまでの間に腰部，肩部・上肢，バットの順に体幹の長軸まわりの角速度のピークが出現したことから、各セグメントの順序的な回転運動によってバットを加速させていることを示した。また、宮西 (2006) は大学野球選手の通常のバッティング動作を分析し、ヘッドスピードが大きい選手は小さい選手に比べて、スイング中期（踏出し足接地からインパクトの間の中点）に鉛直軸まわりの身体の角運動量が大きいことを報告している。これらの先行研究は、①競技レベルの高い野球選手は身体の前位部（足腰部）から先端部（バット）までの各セグメントを順に回転させて打撃動作を行うことと、②スイング中期までに鉛直軸まわりの身体の角運動量を増加させることがヘッドスピードを大きくするために重要であることを示している。しかしながら、先行研究では各セグメントの回転運動がヘッドスピードの生成にどの程度貢献するかは明らかにされていなかった。本章はこの問題に対して、Sprigings et al. (1994) の方法を用いて体幹および上肢の各関節の回転運動が生み出し得るヘッドスピードを定量化した。これにより、肩関節の回転運動はヘッドスピー

ドの増大にほとんど貢献しておらず、スイング局面前半は体幹の関節運動、後半は手関節の回転運動が任意の瞬間のヘッドスピードを構成する各関節運動が生じさせる成分の中で大部分を占めていることが示された。

Sprigings et al. (1994) の方法論を用いて各セグメントの貢献を分析した研究に、テニスのラケット中心の合成速度に対する関節運動の貢献度を算出した研究 (Gordon and Dapena 2006) がある。この研究によると、ラケットが前方に加速を始めた直後の体幹の回旋運動による貢献が最も大きく、その瞬間のラケットスピードの約 50%を占める。また、インパクトが近づくとつれて、徐々に肩関節の内旋運動、肘関節の伸展運動、手関節の掌屈運動の貢献が大きくなり、インパクト直前のラケットスピードへの貢献はそれぞれ 30% 近くを占めることが報告されている。これらのことから、野球のバッティングとテニスサーブでは、スイング動作の初期から中期にかけて体幹の回転運動による貢献が比較的大きいという共通点がみられた。しかし、中期以降では、テニスサーブは肩関節と肘関節の貢献が大部分を占めているのに対して、野球のバッティングでは肩関節の回転運動の貢献は非常に小さく、インパクト直前には負の貢献を示した。この相違は、使用する打具の質量やその操作方法（片腕、もしくは両腕）に起因するものと推察されるが、同じ打撃動作であったとしても打具の先端を加速させるための方策が異なることが示された。

3.3 ヘッドスピードの被験者間差を説明するキネマティクスの要因

図 2-9 は Deterministic model における 1st level (インパクト直前のヘッドスピード) と 2nd level (踏出し足接地時のヘッドスピードと各局面のヘッドスピード変化) との相関関係、および 1st level と 3rd level (各関節の回転運動が生み出したヘッドスピード変化) との相関関係を示したものである。2nd level における各局面 (踏出し足接地時、スイング局面始動期、前期、後期) のヘッドスピード変化の平均値は、インパクト直前のヘッドスピードの平均値 (35.2m/s) に対して、それぞれ 6, 6, 62, 26%の割合を占めていた (表 2-2)。また、インパクト直前のヘッドスピードには、スイング局面始動期におけるヘッド

スピード変化との間には負の相関関係 ($r = -0.43$, $p < 0.1$) が、スイング局面前期におけるヘッドスピード変化との間には正の相関関係 ($r = 0.71$, $p < 0.05$) が認められた。これらの結果は、インパクト直前のヘッドスピードが大きい被験者ほどスイング局面始動期のヘッドスピード変化が小さく、かつスイング局面前期のヘッドスピード変化が大きいことを示している。つまり、踏出し足接地時からヘッドスピードを漸増的に増加させるような打撃動作ではなく、踏出し足の足部が完全に地面に接地するまではヘッドスピードの増加を最小限に抑え、その直後より急激に加速させるような打撃動作を行う被験者ほど、インパクト直前のヘッドスピードが大きいことが明らかになったのである。

このような特徴をもつ打撃動作はどのように生み出されたのかを、1st level と 3rd level (各関節の回転運動が生み出したヘッドスピード変化) との間の相関関係に基づいて考察する。インパクト直前のヘッドスピードには、スイング局面始動期の肩関節の回転運動が生み出したヘッドスピード変化との間に負の相関関係 ($r = -0.47$, $p < 0.1$) が、スイング局面前期の下腕関節の回転運動が生み出したヘッドスピード変化との間には正の相関関係 ($r = 0.48$, $p < 0.1$) が認められた (図 2-9, 2-10)。また、スイング局面始動期の肩関節と前期の下腕関節によるヘッドスピード変化の平均値は、当該局面のヘッドスピード変化の平均値 (2.2, 21.7m/s) に対して、それぞれ-3, 10%の割合を占めていた (表 2-3)。これらの結果は、インパクト直前のヘッドスピードが大きい被験者ほどスイング局面始動期において肩関節によるヘッドスピード変化が小さく、スイング局面前期においては下腕関節の回転運動によってヘッドスピードを大きく増加させていることを示している。実際、ヘッドスピードが大きい被験者 3 名 (LG) と小さい被験者 3 名 (SG) について、スイング局面始動期の肩関節角速度 (ω_{sj}) の変化量をみると、LG は 1.6 ± 0.3 rad/s (X 成分: 0.4 ± 0.9 rad/s, Y 成分: 0.2 ± 1.1 rad/s, Z 成分: 0.2 ± 0.7 rad/s) であったのに対し、SG は 3.8 ± 0.6 rad/s (X 成分: 1.8 ± 0.5 rad/s, Y 成分: 2.7 ± 0.1 rad/s, Z 成分: 0.9 ± 1.8 rad/s) であり、LG の方が SG より小さかった。また、スイング局面前期の下腕関節角速度 (ω_{LTI}) の変化量は、LG は 8.5 ± 1.6 rad/s (X 成分: -0.5 ± 1.8 rad/s, Y 成分: $-0.9 \pm$

0.5rad/s, Z 成分 : 8.2±1.6rad/s) であったのに対し, SG は 6.2±2.3rad/s (X 成分 : -3.0±1.3rad/s, Y 成分 : -0.1±2.2rad/s, Z 成分 : 4.7±2.5rad/s) であり, LG の方が SG より大きかった. つまり, 踏出し足の足部が完全に地面に接地するまでは肩関節の回転速度を極力小さくし, その直後からは下胴関節の回転 (体幹の捻り戻し) を利用してバットを急激に加速させるような打撃動作を行う被験者ほど, インパクト直前のヘッドスピードが大きいことが示された. この結果は, バッティング指導において頻繁に指摘される『肩の開きを抑える』という動作を定量的に説明するものと考えられる. 右打者を頭上から見下ろした場合, スイング局面始動期にはバットヘッドが 3 塁側, もしくは捕手側へ移動する (図 2-11) ことから, 肩関節の回転運動によりバットの反時計まわりへの回転を静止, または反転させることは, スイング局面前期からインパクトまでにバットヘッドが加速する距離を維持することに繋がるものと考えられる. 『肩の開きを抑える』ことができた被験者ほど, インパクト直前のヘッドスピードが大きいことが示された本章の結果は, この指導の有効性を支持するものである.

スイング局面前期においてヘッドスピードを急増させることの意味は先行研究を用いて説明することができる. バッティングはシステム (身体+バット) がもつ角運動量の大部分をバット-両手間に作用する内力によってバットに伝達することでバットヘッドを加速させる (矢内 2007) のであるが, 宮西 (2006) のデータは, システムがもつ鉛直軸まわりの角運動量がスイング局面前期に急増し, 中期でピークに達した直後, 急減しながらバットの角運動量が急増することから, 打者が自ら生み出した角運動量がスイング局面後期にバットへ伝達されることによってヘッドスピードが大きくなることを示している. これらの先行研究に関連付けて本章の結果を解釈すると, 鉛直軸まわりの角運動量を急増させる時期であり, 身体の角運動量がピークに達する時期でもあるスイング局面前期のヘッドスピード変化が大きい被験者ほど, インパクト直前のヘッドスピードが大きいということになる. また, 本章でインパクト直前のヘッドスピードが大きい被験者は, スイング局面前期において, 下胴関節の回転運動が生み出すヘッドスピードを増加させる (先行して上

昇しつつある骨盤の角速度に追いつくべく胸郭を回転させる) ことによってヘッドスピードを大きく増加させていた。打者の身体を骨盤を中心に上・下半身の 2 セグメントとして考えた場合、下胴関節が投手方向へ回転することにより、下半身のセグメントは作用・反作用の関係から捕手方向へ回転しようとする。しかしながら、両足は地面に完全に接地しているため、両足には地面反力によって投手方向へ回転するモーメントが作用することになる。身体の角運動量は主に両足に作用する地面反力によるモーメントによって生み出されている(矢内 2007) ことから、スイング局面前期に下胴関節の回転運動が生み出すヘッドスピードを増加させることは、地面反力によるモーメントを増大させ、身体の角運動量を増大させることに繋がり、その結果、ヘッドスピードの増加をもたらしたと推察される。

スイング局面後期におけるヘッドスピード変化には被験者間差が小さく ($9.2 \pm 1.8 \text{m/s}$) , インパクト直前のヘッドスピードとの間に相関関係は認められなかった。その理由は、この時期はスイング局面の中で最も高速な運動を行っている局面であることから、体幹および上肢の筋群の力発揮環境(主に収縮速度)の変化により、各関節の回転運動が生み出せるヘッドスピードの大きさが限定されたことが原因の 1 つと考えられる。また、この期間は極めて短く (0.040 ± 0.003 秒) , 十分な加速が得られなかったことも影響しているものと推察される。このことから、インパクト直前のヘッドスピードの大きさは、スイング局面前期においてシステムがもつ角運動量をどれだけ増大させておくかによって決定されると考えられる。

3.4 本研究の信頼性および限界

本章における相関分析の目的は、ヘッドスピードを構成する多数の変量の中からインパクト直前のヘッドスピードの被験者間差を説明する因子を特定することにより、パフォーマンス向上に寄与する可能性のある動作やその特徴を見極めることであった。指導現場ではパフォーマンスを向上させるために、選手やコーチは手探りの中、様々な練習や指導を

行っており、現場ではそれらの効果を裏付ける結果が求められていると推察される。本章では統計の有意水準を 10%未満に設定したことから、得られた結果についてタイプ I エラー (null hypothesis を誤って棄却する過誤) による不利益の増加が懸念された。しかしながら、先述した現場的視点を考慮すると、タイプ I エラーによる不利益よりもタイプ II エラー (誤った null hypothesis を支持する過誤) による不利益の方が大きくなると思われるため、有意水準を 10%未満に設定することを採用した。実際に、本章で得られた結果 (踏出し足が完全に接地するまでは肩を開かないことや、その直後から骨盤の回転に遅れないように胸郭を回転させること) は、現場で頻繁に用いられている指導方法を支持するものであり、力学的にみても解釈可能なものであったことから、信頼性の高い結果を示すことができたと考えられる。

また、本章はバッティングにおける時間的・空間的な制約を排除したティースタンドを用いた打撃が分析対象であったことから、被験者は最大努力でスイングを行っていたと考えられる。しかしながら、投球されたボールを打撃していないため、試合で観察されるようなバッティング動作における各関節運動が生み出すヘッドスピードを反映できていない可能性がある。さらに、本章で用いた方法論では、選手の両腕に備わっている各関節の運動がヘッドスピードに及ぼす影響を個別に評価できないことや、得られた結果を説明する原因を詳細に記述することができないため、パフォーマンスを向上させるための具体的な動作については推測の域を出ない。今後は、キネティクスの解析や投球されたボールを捉える実戦的な技術を考慮し、ヘッドスピードを生成・増大させるメカニズムを明らかにしていく必要があるだろう。

4. まとめ

本章では、大学野球選手にティースタンドを用いたバッティングを行わせ、その動作から Sprigings et al. (1994) の方法を用いて、体幹および上肢の各関節の回転運動が生じさせ得るバットのヘッドスピードを定量的に示した。また、算出した値からインパクトの瞬

間においてヘッドスピードを増加させるためのキネマティクスの要因について検討した。

その結果、スイング局面の前半では体幹の関節運動、後半では手関節の回転運動がヘッドスピードの大部分を生じさせていることが示された。また、インパクト直前のヘッドスピードの大きさ（35.2m/s）に対して、手関節の回転運動によって生み出したヘッドスピード（27.3m/s）が最も大きく、続いて下腕関節と骨盤の回転運動（4.6m/s）、上腕関節（1.7m/s）、骨盤の並進運動（0.2m/s）の順に大きいことが示された。しかしながら、肩関節の回転運動は全要素の中で唯一、負の値（-3.2m/s）を示すことが明らかとなった。また、インパクト直前のヘッドスピードを増加させるためには、スイング局面の始動期（SFC～HC）において、肩関節の回転速度を極力小さくする（肩の開きを抑える）ことによりヘッドスピードの増加を最小限に抑え、インパクトまでのバットヘッドの加速距離を維持すること、前期（HC～MID）において、下腕関節の回転運動（骨盤の回転に遅れないように胸郭を回転させること）により身体の角運動量を増大させ、ヘッドスピードを急増させることが重要であることが示された。

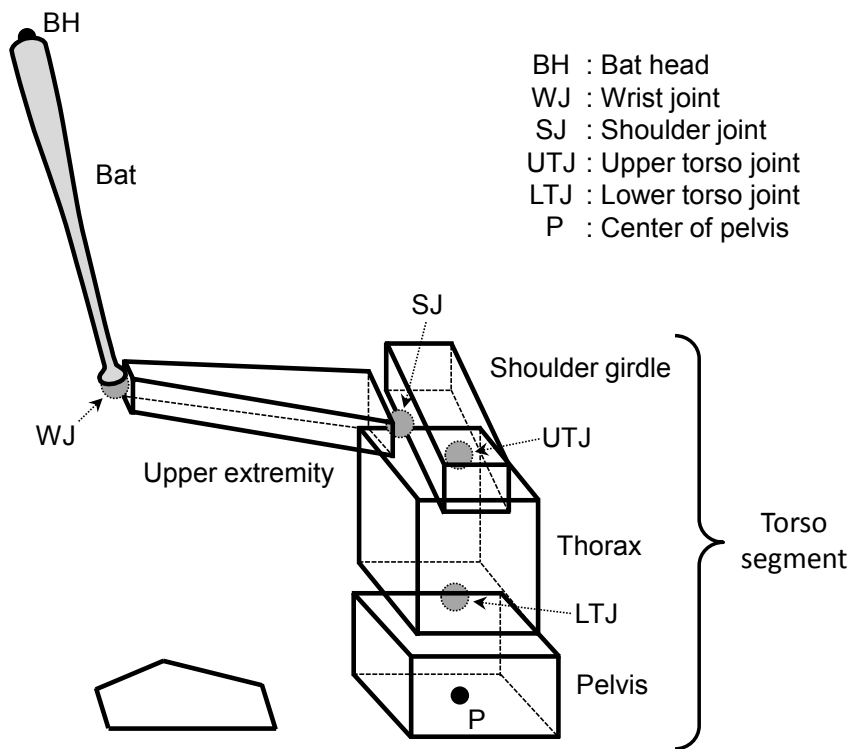


図 2-1 分析に用いた剛体リンクモデル.

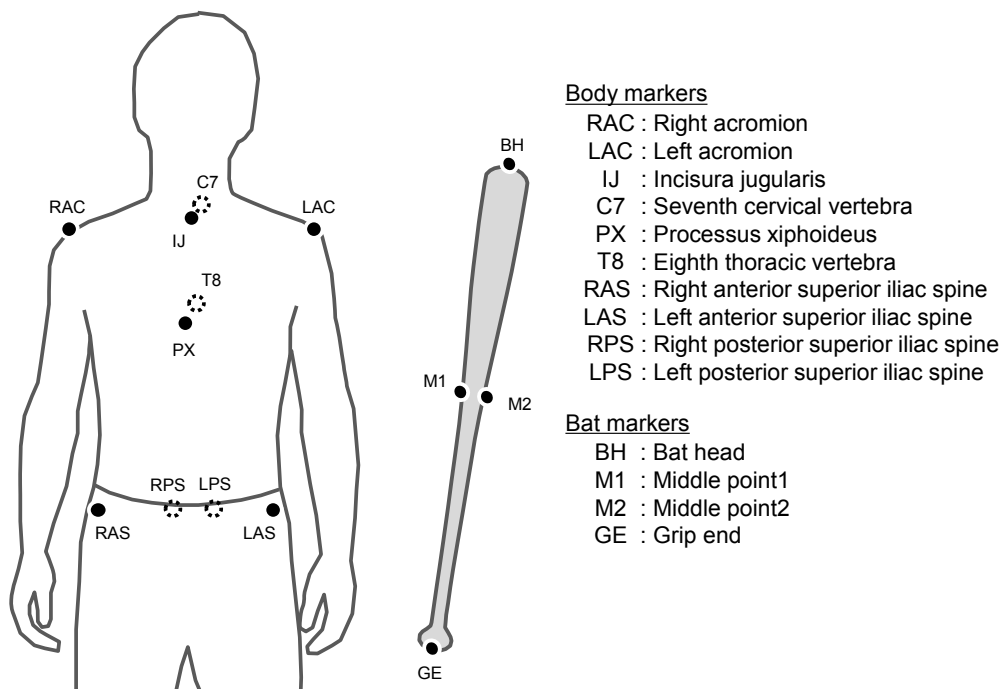


図 2-2 反射マーカの貼付位置.

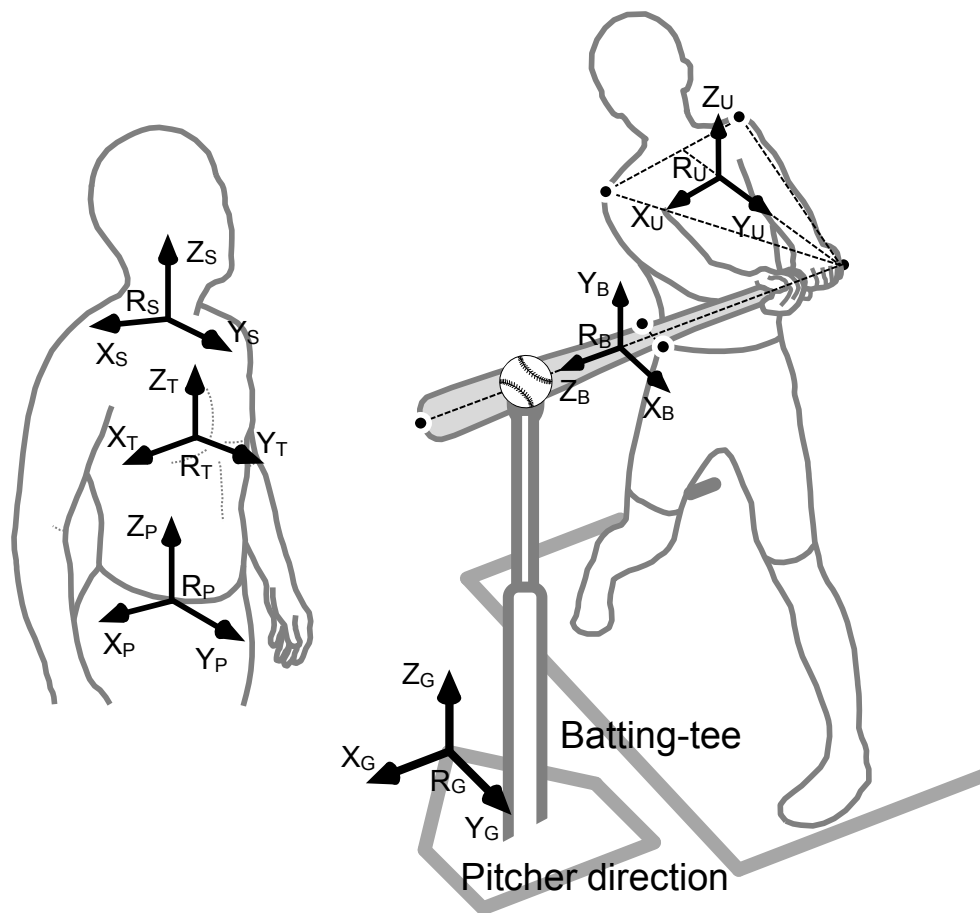


図 2-3 座標系の定義.

表 2-1 スイング局面における各時期の出現時間と percent swing phase.

	Appearance time [s]		Percent swing phase [%SP]	
	Mean	SD	Mean	SD
SFC	-0.234	0.052	0	
HC	-0.141	0.022	39	9
MID	-0.040	0.003	83	4
BI	0.000		100	

SFC : Step foot contact

HC : Heel contact

MID : The point the long axis of bat projected onto horizontal plane became parallel to Y-axis of global coordinate system.

BI : The instance of immediately before ball impact.

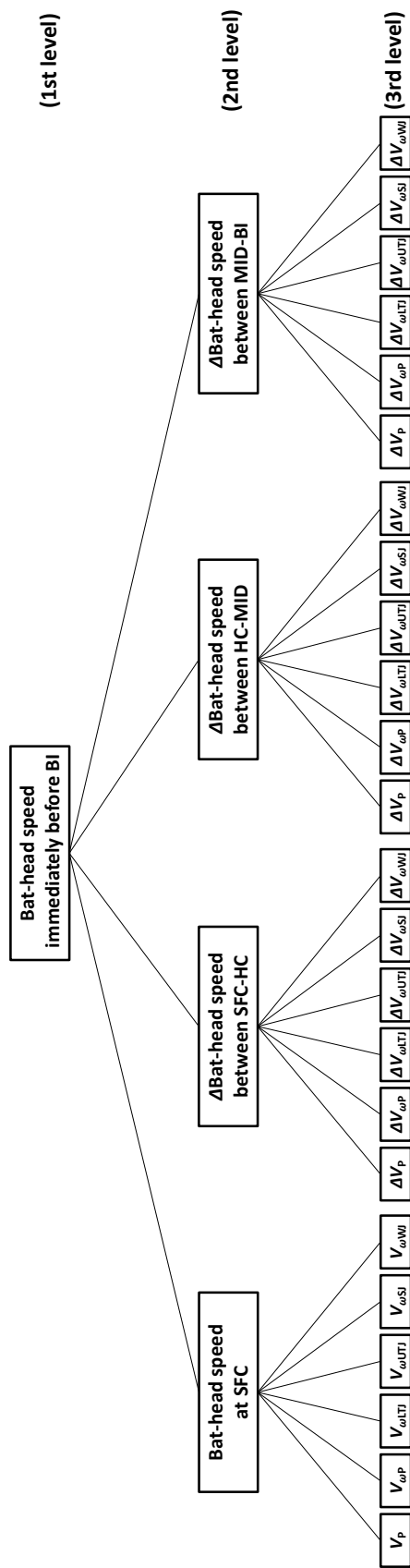


図 2-4 インパクト直前のヘッドスピード決定する要因。第 3 レベルの各パラメータは、骨盤の並進、骨盤の回転、下胴関節、上胴関節、肩関節、手関節が生み出し得るヘッドスピードを示している。

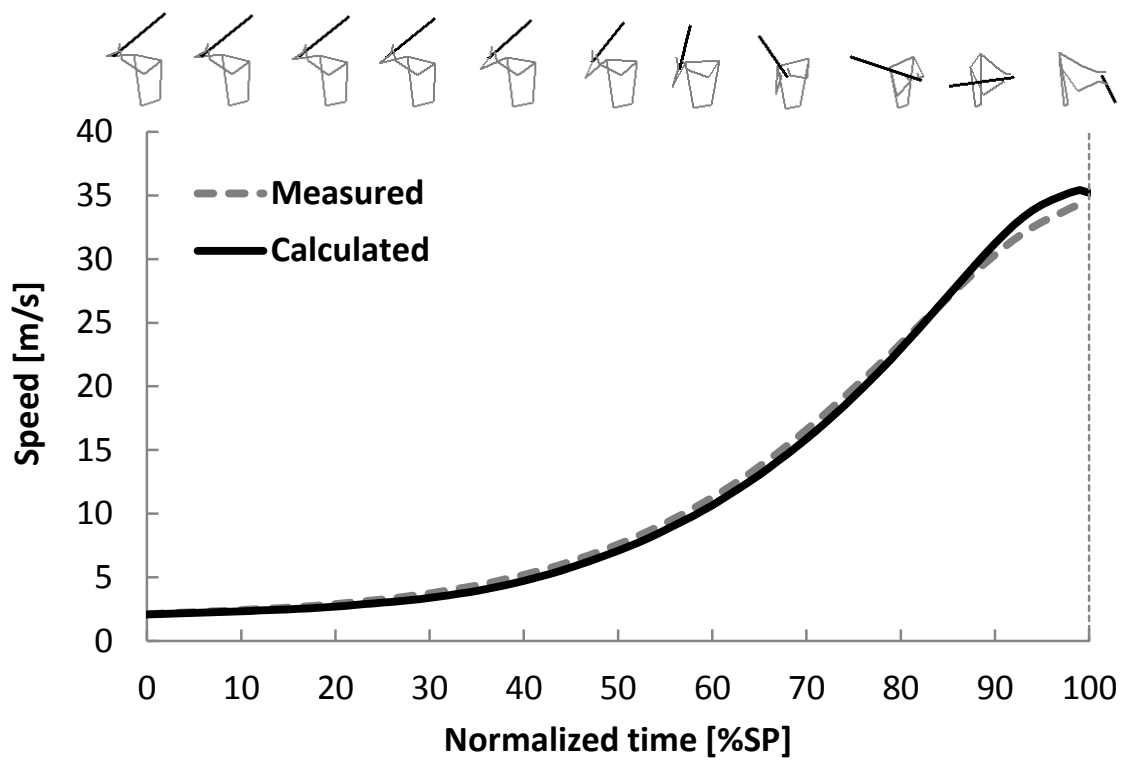


図 2-5 計測値と算出値のヘッドスピードの平均変化パターンの比較.

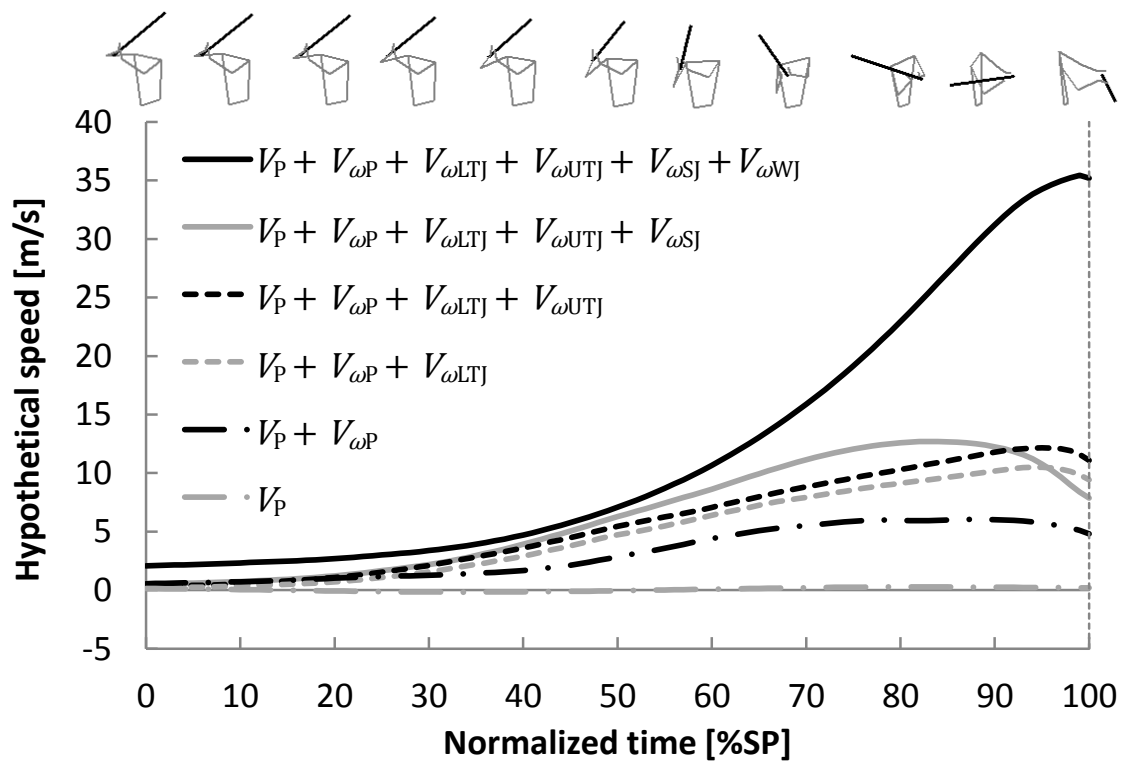


図 2-6 各関節が生み出すヘッドスピードの和の平均変化パターン.

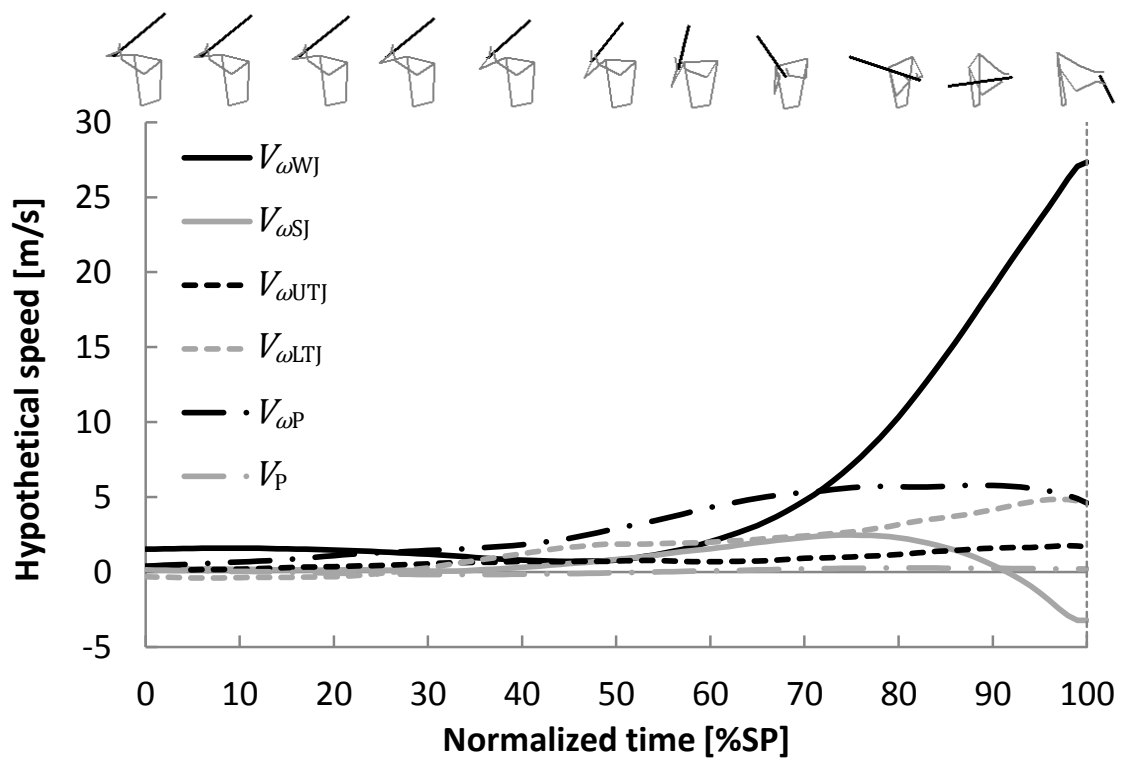


図 2-7 各関節が生み出すヘッドスピードの平均変化パターン.

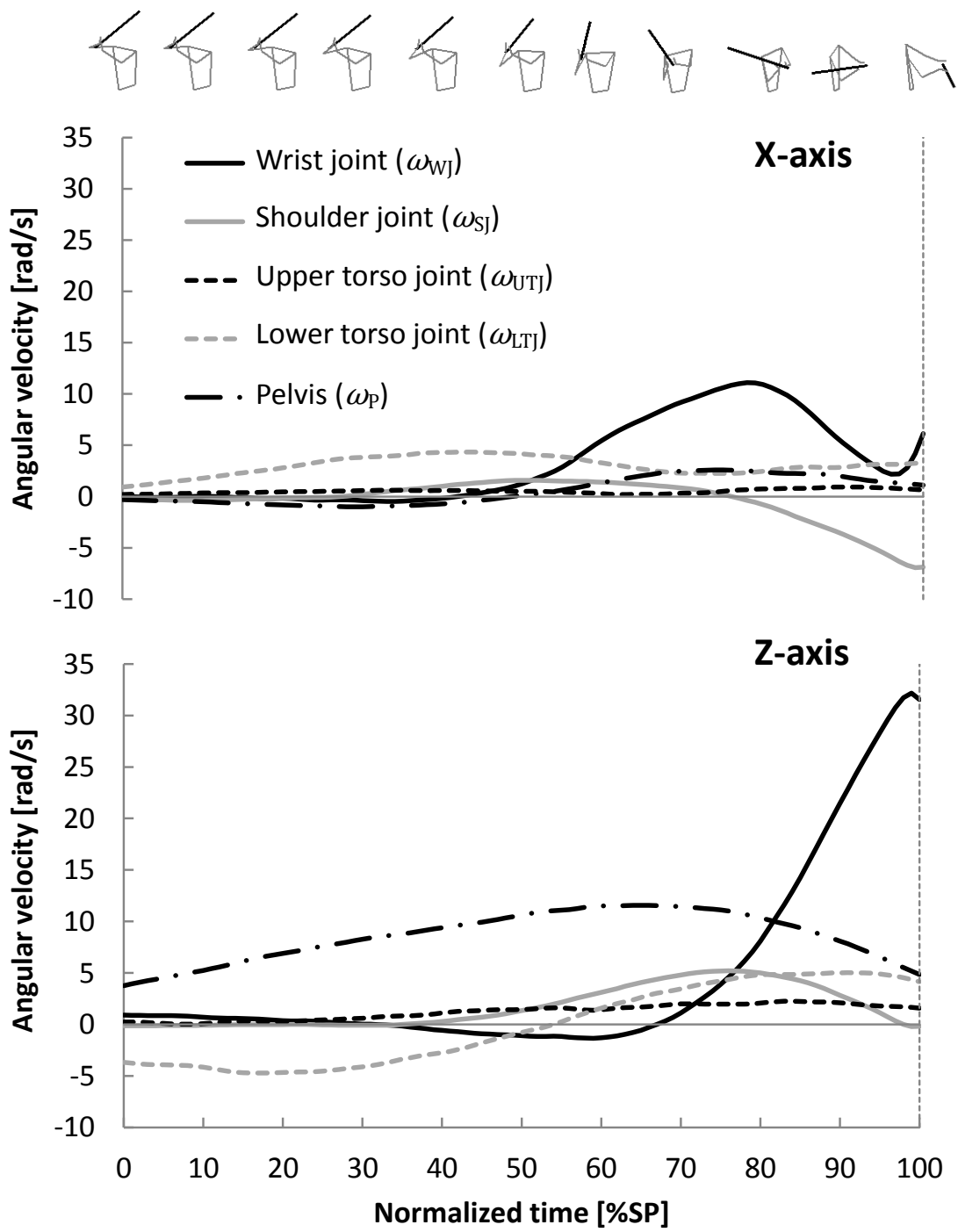


図 2-8 骨盤と各関節の角速度の平均変化パターン。

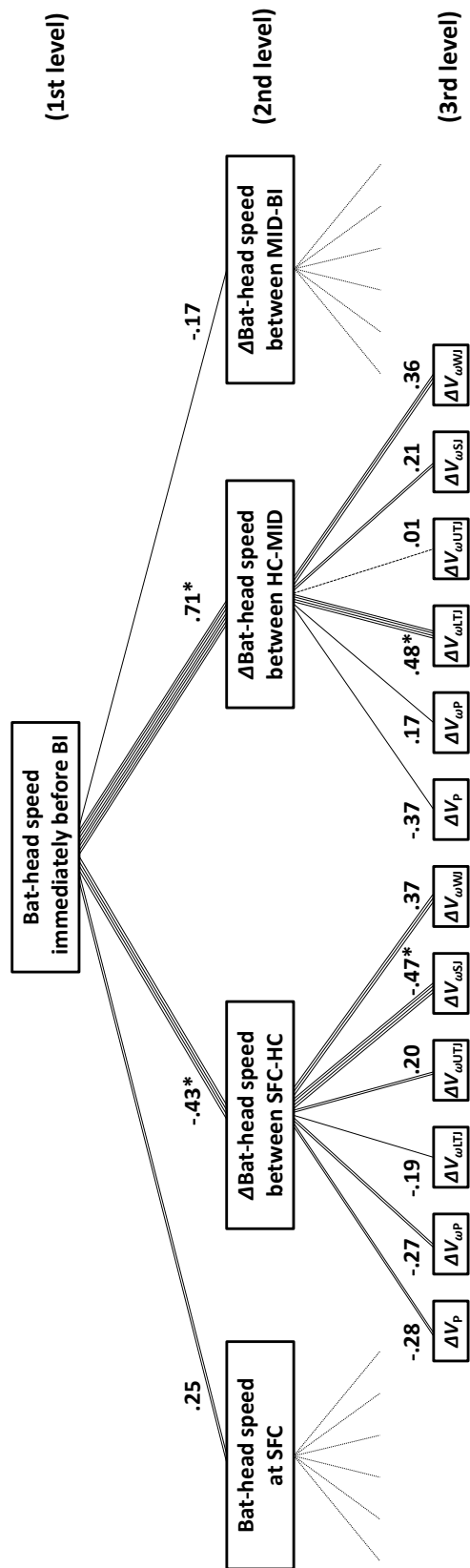


図 2-9 インパクト直前のヘッドスピードとの相関関係。*は有意な相関関係を示す。ブロックを結ぶラインの数は、相関の強さを表す（例：3本のラインは $r=0.3$ ）。

表 2-2 各局面のヘッドスピードの変化量, およびインパクト直前のヘッドスピードに対する割合.

	SFC	Change			BI
		SFC-HC	HC-MID	MID-BI	
Mean [m/s]	2.1	2.2	21.7	9.2	35.2
SD	1.0	1.8	2.7	1.8	1.7
Percentage	6%	6%	62%	26%	100%

表 2-3 各局面において各関節が生み出したヘッドスピードの変化とその割合。

		ΔV_P	$\Delta V_{\omega P}$	$\Delta V_{\omega LTJ}$	$\Delta V_{\omega UTJ}$	$\Delta V_{\omega SJ}$	$\Delta V_{\omega WJ}$
SFC-HC	Mean [m/s]	-0.4	1.2	1.5	0.5	-0.1	-0.6
	SD	0.4	1.2	2.0	0.6	0.8	0.9
	Percentage	-18%	56%	69%	23%	-3%	-27%
HC-MID	Mean [m/s]	0.5	4.2	2.1	0.8	2.0	12.2
	SD	0.3	1.1	1.9	0.8	1.4	1.9
	Percentage	2%	19%	10%	4%	9%	56%
MID-BI	Mean [m/s]	-0.1	-1.2	1.3	0.2	-5.3	14.2
	SD	0.2	1.3	1.6	0.9	2.4	1.8
	Percentage	-1%	-13%	15%	2%	-58%	155%

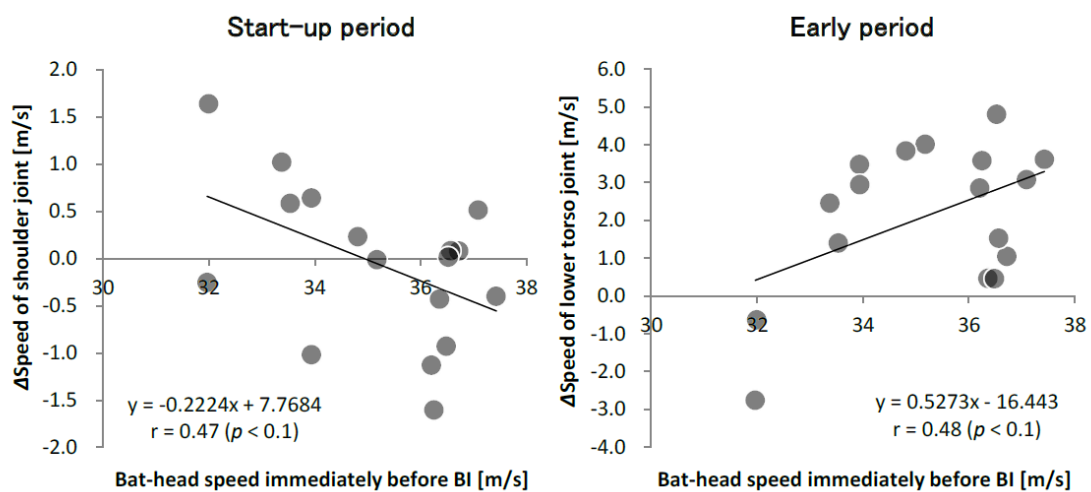


図 2-10 インパクト直前のヘッドスピードと、スイング始動期（SFC-HC）の肩関節によるスピード変化量およびスイング局面前期（HC-MID）の下胴関節によるスピード変化量との関係。

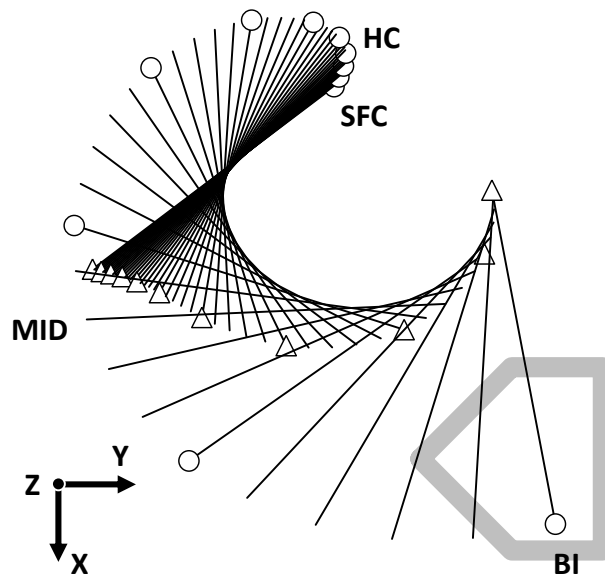


図 2-11 XY 平面でみたスイング軌道の典型例. ○と△は, それぞれ 10%SP 毎のバットヘッドとグリップエンドを示す.

第3章 バットの運動が生み出されるメカニズム

第1節 インパクト時のバットのヘッドスピードと方位を決定する力学的要因

1. 緒言

野球の試合において多くの点を獲得するためには、打者は出塁する確率を高めることに加えて、ヒットやホームランとなる高速度で飛距離の長い打球を放つことが求められる。打者がこのような打球を放つためには、投球されたボールがホームベース上に到達するまでの限られた時間内にバットの先端部（バットヘッド）を可能な限り加速させると同時に、投球軌道に対してバットヘッドが空間的に最適な位置に到達するようにスイング軌道をコントロールしてボールに衝突させる技術が必要となる。バットのスイング軌道は、バット重心の並進運動と回転運動の組み合わせによって構成されているが、特に回転運動によって変化するバットの姿勢は、インパクトにおいてバットヘッドの空間的な位置だけでなく打球の飛翔方向にも影響を及ぼす（McIntyre and Pfautsch 1982, 城所ら 2012）ことから、バットの回転運動はスイング軌道をコントロールする上で重要な役割を果たしていると考えられる。

先行研究では打撃のパフォーマンスを測る指標としてバットヘッドの速度（ヘッドスピード）が用いられることが多く、主にインパクト時のヘッドスピードを増加させるキネマティクスの要因が検討されてきた（田内ら 2005, 川村ら 2008, Inkster et al. 2011）。川村ら（2008）は、インパクト時のヘッドスピードが高い選手（上位群）と低い選手（下位群）の上肢の関節運動を比較し、上位群は下位群よりもボトム側（バットのグリップ寄り）を把持する側）の上肢の肩関節の内転、および水平内転角度を大きくしてスイングしていることを報告した。また、本学位論文の第2章では、インパクト直前のヘッドスピードが高い選手ほどスイング局面前半において体幹の捻り戻し（骨盤に対する胸郭の回転）の角速度が大きいことを示した。この結果について、体幹を高速度で捻り戻す動作は、スイング局面中盤において身体の角運動量を増大させることに繋がり、身体の角運動量がバットに伝達する（宮西 2006）ことによってヘッドスピードを急増させたと考察した。これ

らの先行研究は、インパクト時のヘッドスピードと身体運動との関係を力学的に考察しており、大きなヘッドスピードでインパクトを迎えるには、スイング局面中盤までに身体の角運動量を増大させておく必要があり、そのためにはボトム側の上肢を体幹に近づけたまま骨盤に対して胸郭を高速度で回転させることが重要であることを示している。

スイング軌道のコントロールに関しては、打者の両手がバットに加えた力系を直接計測することができるセンサー・バットによって、バットの鉛直方向の移動距離や加速に対して上肢の各関節トルクやバットに作用した力系がどれだけ貢献しているのかが検討されている（小池ら 2009, 阿江ら 2013, 阿江ら 2014）。小池ら（2009）の研究では、スイング開始からインパクトに向けて加速するヘッド速度の鉛直成分は、身体運動によって生じる運動依存による力の貢献が大きく、主にバットのボトム側を把持する上肢の肩関節内外旋トルクとトップ側（バットのヘッド寄り）を把持する上肢の手関節掌背屈トルクによって生み出されていることを示している。また、阿江ら（2013）は打点高を変化させたティー打撃において、左右各手がバットに加えた力やモーメントがなした仕事を算出し、バットの打撃部位を打点高に合わせるためにノブ側の手がバットの長軸方向（バットヘッドからグリップエンドの方向）に加える力の鉛直成分がバットの高さ調整に寄与していることを報告している。さらに、バットの起し倒しに関与する軸（バットの長軸に直交し、かつ水平面と平行になる軸：起し倒し軸）まわりの左右各手の作用モーメントと偶力成分がバットの鉛直下方向への回転を抑制していることを示唆している。これらの研究から、スイング中のバットヘッドの高さは、セグメントの運動によって発生する関節力やそのモーメントによって下方へ変化するが、その移動距離を打者がバット長軸方向の力と起し倒し軸まわりの回転効果を加えることによって調節していると推察される。しかしながら、水平方向のバットヘッドの位置や打球の左右方向に影響を及ぼすバットの方位変化がどのようなメカニズムで生じているかは検討されていない。

このように野球の打撃動作が詳細に分析されてきたことで、バットのヘッドスピードやスイング軌道を生み出す身体運動やそのメカニズムが明らかにされてきた。しかし、打撃

のパフォーマンス指標となる打球の速度や飛距離はインパクト直前のボールとバットの運動やその後の衝突様式によって変動するため、パフォーマンスを向上させるための打撃動作は先行研究で明らかにされてきた動作だけに限定されず、無数に存在するものと考えられる。このような特性をもつ動作において、巧みな動作やそれを獲得するための方法論を明らかにするためには、打者の全身運動がもたらす最終的なアウトプット（バットの運動）が、どのような力によって生み出されているかというキネティクス的な特徴を理解することが重要となる。このことは、打者がどのような力をどのタイミングでどの方向に加えることによって、バットが加速し、方位変化が生じているかを知ることにつながるため、各打者が理想とするバットスイングを獲得し、状況に応じたバットコントロールを可能にするために、どのようなアプローチまたはトレーニングを行えば良いかを合理的に考察するのに役立つことが期待できる。そこで本節では、打者の両手がバットに加えた力系の各成分がもたらすバットのヘッドスピードおよび方位変化に対する貢献度を明らかにすることで、インパクト直前のバットのヘッドスピードと方位を決定するメカニズムを検討した。

2. 方法

2.1 被験者

大学野球 1 部リーグに所属する 17 名の野手（身長： $1.74 \pm 0.04\text{m}$ ，体重： $71.1 \pm 6.6\text{kg}$ ，右打者 8 名，左打者 9 名）を対象に実験を行った。なお、この実験に参加した被験者及び後述するデータ収集の方法は、全て第 2 章の研究と同一のものとした。

2.2 データ収集

実験は屋内実験場を使用し、被験者には通常の準備運動を行わせた後、打席位置から投手方向に約 5m 離れた防球ネットに向かってティースタンドを用いた打撃を行わせた。ティースタンドは被験者のストライクゾーンの真ん中に設定されるように、打撃姿勢での上前腸骨棘の高さに調節し、前後および左右の位置は被験者の任意で決定した。各被験者に

は、2種類の硬式用木製バット（League Champ Pro, SSK 社製, 表 3-1）から任意で選択させたバットを用いて、ライナー性の打球を試合と同様の打撃フォームでセンター方向に打つように教示した。実験は、打球がセンターラインを中心に左右 15°以内に放たれ、かつ自己評価の高い試技が各被験者 3 試技得られるまで継続した。収集した 3 試技のうち、インパクト直前のバットのヘッドスピードが最も大きい 1 試技（計 17 試技）を分析対象とした。なお、使用したバットの重心位置はリアクションボード法（Hay 1993）を用いて算出した。また、短軸まわりの主慣性モーメント（ I_y , I_z ）は、バットを振り運動させた際の周期からグリップエンドまわりの慣性モーメントを算出した後、平行軸の定理を用いて算出した。長軸まわりの主慣性モーメント（ I_x ）は、バットを円周 0.198m の単一密度の円柱とみなして算出した。

実験試技は、光学式モーションキャプチャシステム（VICON MX, Oxford Metrics 社製）を用いて、被験者の身体表面、バット、およびボールに貼付した反射マーカの 3 次元位置座標の計測を行った。反射マーカは身体表面に 14 点、バットに 4 点、ボールに 2 点貼付した。このとき、被験者の周囲に専用の赤外線カメラを 13 台配置し、サンプリング周波数は 500Hz に設定した。既知のバット長に対してインパクト直前 170 フレーム間において計測されたバット長の二乗平均誤差は 2mm 以下であった。

2.3 分析モデルと座標系の定義

打者がバットスイングを行う際、グリップエンド付近を握っている両手は互いに接触していることから、打者の両手部がバットに加えた全ての力を同値の力-偶力系（1 つの合力と 1 つの偶力：ベアーとジョンストン 2003）としてモデリングした。このときの合力は、両手の中間点に作用するものとみなし、日本人の最大手幅の平均値（河内 2012）を参考にグリップエンドから 0.12m 離れた位置に設定した（図 3-1-1）。偶力は回転軸の位置に依存しないモーメントを生み出す 2 力、またはモーメントそのものを意味する。したがって、本節で算出する合力と偶力の値は、手部とバットの連結部を「関節」とモデル化した

際の関節力と関節トルクに相当する。なお、本節では打者の両手がバットに加えた合力と偶力をそれぞれ「両手合力」、および「両手トルク」と定義した。

ホームプレートの捕手側の頂点を原点とする右手直交座標系 $R_G (X_G, Y_G, Z_G)$ を定義し、基準座標系として用いた。 R_G は原点から投手方向を Y_G 、 Y_G に垂直で原点から左打席に向かう方向を X_G 、鉛直上方向を Z_G として定義した。また、本節ではバットの重心に固定した 2 つの移動座標系を定義した (図 3-1-2)。1 つは、 R_G について計測したバットヘッド (BH)、グリップエンド (GE)、およびその中間点 (MP1, MP2) の座標値を用いた移動座標系 (バット座標系 $R_B : X_B, Y_B, Z_B$) であり、 R_B は GE から BH に向かう方向を X_B 、 X_B と MP1 から MP2 に向かうベクトルの外積を Y_B 、 X_B と Y_B との外積を Z_B とした。 R_B は R_G からみたバットの方位変化を表すために用いた。もう 1 つは、GE に対する BH の速度ベクトルに応じて変化する移動座標系 (スイング座標系 $R_S : X_S, Y_S, Z_S$) であり、 R_S は R_B の X_B と同様の軸を X_S 、 X_S と GE に対する BH の速度ベクトルの外積を Z_S 、 Z_S と X_S の外積を Y_S と定義した。 R_S の X_S と Y_S からなる面はバットスイングの軌道面、 Z_S はその面に垂直な軸を表しており、この座標系はバットに作用する力-偶力系を表すために用いた。つまり、打者の両手がバットに加えた両手合力を R_S について表すと、 X_S 成分がバット長軸方向、 Y_S 成分がヘッド加速方向、 Z_S 成分がスイングの回転軸方向への力を示す。両手トルクについては、 X_S 成分がバット長軸まわりのローリング、 Y_S 成分がスイング軌道の制御、 Z_S 成分がスイングの角加速をもたらすモーメントを示す。

2.4 運動方程式

ニュートン・オイラーの運動方程式を用いて、バットに作用した力-偶力系を算出した。本節で表す数式は、**太字**を 3×1 のベクトル、*斜体*をスカラー、**太字かつ斜体**を 3×3 の行列として記述した。

ニュートンの運動方程式を用いて、バットの運動を R_G について表すと、

$$\mathbf{F}^H + m\mathbf{g} = m\mathbf{a} \quad (1)$$

となる。 \mathbf{F}^H , m , \mathbf{a} , \mathbf{g} は、それぞれ両手合力、バットの質量、バット重心の加速度、重力加速度を示す。また、オイラーの運動方程式を用いてバットの回転運動を \mathbf{R}_B について表し、歳差運動を意味する項を移項し、バットの運動に依存するモーメントを表す項とみなすと、

$$\mathbf{C}_B + \tilde{\mathbf{r}}_B \mathbf{F}_B^H - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_B \mathbf{I}_B \boldsymbol{\omega}_B = \mathbf{I}_B \dot{\boldsymbol{\omega}}_B \quad (2)$$

となる。添字の「 B 」はバット座標系 \mathbf{R}_B について表したベクトル又は行列、「 \sim 」は 3×3 の歪対称行列を示す。 \mathbf{C} , \mathbf{r} , \mathbf{I} , $\boldsymbol{\omega}$, は、それぞれ両手トルク、バット重心から作用点に向かう位置ベクトル、バットの主慣性モーメントを対角成分とした慣性テンソル、バットの角速度を示す。また、 $-\tilde{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}$ は主慣性モーメントの各成分が同一ではないバットにおいて、バットの角運動量ベクトルに対してバットの方位が変化することによって生じる運動依存のモーメント（ジャイロ効果：Hibbeler 2013）、 $\tilde{\mathbf{r}} \mathbf{F}^H$ は両手合力によるバット重心まわりのモーメントを意味する。収集したバットの座標値から計算した運動学的パラメータ (\mathbf{a} , $\boldsymbol{\omega}$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}$) を式 (1), (2) に代入することで、両手がバットに作用させた力・偶力系の各成分（両手合力、両手トルク、両手合力のモーメント、ジャイロ効果）を算出し、座標変換行列を用いてそれぞれをスイング座標系 \mathbf{R}_S から計測した値に変換した。

2.5 力・偶力系の各成分が生み出すバットのヘッドスピードと角度

力・偶力系の各成分がバットのヘッドスピードにどれだけ貢献したかを算出するため、各成分が生み出したヘッドスピードを順動力学手法により導出する。ヘッドスピードは、バット重心が並進することによって生じるスピードとバットが重心まわりに回転することによって生じるスピードとの和として以下のように表すことができる。

$$V_{BH} = \mathbf{u}_{BH} \cdot \mathbf{V}_{CG} + \mathbf{u}_{BH} \cdot \mathbf{V}_{BH/CG} \quad (3)$$

V_{BH} , \mathbf{u}_{BH} , \mathbf{V}_{CG} , $\mathbf{V}_{BH/CG}$ は、それぞれヘッドスピード、ヘッド速度の単位ベクトル、バットの重心速度、バット重心に対するヘッド速度を示す。このとき、 \mathbf{V}_{CG} は両手合力および

重力が生み出した速度， $\mathbf{V}_{BH/CG}$ は両手トルク，両手合力のモーメント，ジャイロ効果が生み出した速度を表す．よって，これらの成分が生み出すバット重心加速度とバット重心に対するヘッド加速度をスイング開始時 (t_i) からインパクト時 (t_f) まで時間積分することにより，力-偶力系の各成分が生み出したヘッドスピードを算出することが可能となる．

バットに作用した全ての力 $\Sigma\mathbf{F}$ が生み出すバット重心の速度 \mathbf{V}_{CG} は運動量と力積の関係から以下のように求めることができる．

$$m\mathbf{V}_{CG}(t_f) = m\mathbf{V}_i(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} \Sigma\mathbf{F}dt \quad (4)$$

$$m\mathbf{V}_{CG}(t_f) = m\mathbf{V}_i(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} (\mathbf{F}^H + m\mathbf{g})dt \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_{CG}(t_f) = \mathbf{V}_i(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} \frac{\mathbf{F}^H}{m} dt + \int_{t_i}^{t_f} \mathbf{g}dt \quad (6)$$

スイング座標系 R_S について算出した両手合力 \mathbf{F}_S^H の各成分 (Fx_S^H , Fy_S^H , Fz_S^H) が生み出すヘッドスピードを算出するため，基準座標系 R_G に対する R_S の方位を表す回転行列 \mathbf{A}_{R_S/R_G} を用いて， R_S について算出した \mathbf{F}_S^H の各成分のベクトルを R_G について計測したベクトル (\mathbf{F}_X^H , \mathbf{F}_Y^H , \mathbf{F}_Z^H) に変換した．

$$\mathbf{F}_X^H = \mathbf{A}_{R_S/R_G} \begin{bmatrix} Fx_S^H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7) \quad \mathbf{F}_Y^H = \mathbf{A}_{R_S/R_G} \begin{bmatrix} 0 \\ Fy_S^H \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8) \quad \mathbf{F}_Z^H = \mathbf{A}_{R_S/R_G} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Fz_S^H \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (6) の両手合力 \mathbf{F}^H は式 (7) ~ (9) の和に等しいため，式 (6) は以下のように記述できる．

$$\mathbf{V}_{CG}(t_f) = \mathbf{V}_i(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} \frac{\mathbf{F}_X^H}{m} dt + \int_{t_i}^{t_f} \frac{\mathbf{F}_Y^H}{m} dt + \int_{t_i}^{t_f} \frac{\mathbf{F}_Z^H}{m} dt + \int_{t_i}^{t_f} \mathbf{g}dt \quad (10)$$

式 (10) の $\mathbf{V}_i(t_i)$ はスイング開始時のバット重心の速度であり，右辺の各項は R_S について算出した両手合力の各成分，および重力が生み出したバット重心の速度を表す．式 (10) から算出される \mathbf{V}_{CG} を式 (3) に代入することにより，式 (10) の各項 (①スイング開始時のバット重心の速度，② Fx_S^H ，③ Fy_S^H ，④ Fz_S^H ，⑤重力) が生み出したヘッドスピードを算

出した。また、 R_S について表したバットの角速度 ω_S を角運動量と角力積の関係を用いて表すと、

$$I_S \omega_S(t_f) = I_S \omega_S(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} \Sigma(I_S \dot{\omega}_S) dt \quad (11)$$

$$I_S \omega_S(t_f) = I_S \omega_S(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} (C_S + \tilde{r}_S F_S^H - \tilde{\omega}_S I_S \omega_S) dt \quad (12)$$

$$\omega_S(t_f) = \omega_S(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} I_S^{-1} C_S dt + \int_{t_i}^{t_f} I_S^{-1} \tilde{r}_S F_S^H dt - \int_{t_i}^{t_f} I_S^{-1} \tilde{\omega}_S I_S \omega_S dt \quad (13)$$

となる。添字の「 S 」は全て R_S について表したベクトル又は行列であり、式 (13) の $\omega_S(t_i)$ はスイング開始時の角速度、右辺の各項はそれぞれ両手トルク、両手合力のモーメント、ジャイロ効果が生み出した角速度を表している。各項が生み出す角速度の Z 成分 (ω_z) にバット重心からバットヘッドまでの距離 $r_{BH/CG}$ を乗じ、さらにその値に計測したバットの座標値から求めた $\mathbf{V}_{BH/CG}$ の単位ベクトル $\mathbf{u}_{BH/CG}$ を乗じることで、各項が生み出した角速度に起因する $\mathbf{V}_{BH/CG}$ を以下のように算出した。

$$\mathbf{V}_{BH/CG} = \mathbf{u}_{BH/CG} \cdot (\omega_z r_{BH/CG}) \quad (14)$$

式 (14) を式 (3) に代入することにより、式 (13) の各項 (⑥スイング開始時のバットの角速度、⑦両手トルク、⑧両手合力のモーメント、⑨ジャイロ効果) が生み出したヘッドスピードを算出した。

次に、力・偶力系の各成分が生み出すバットの方角 (バット角度) を導出する。式 (2) を整理すると、

$$\dot{\omega}_B = I_B^{-1} (C_B + \tilde{r}_B F_B^H - \tilde{\omega}_B I_B \omega_B) \quad (15)$$

となり、バットの角加速度 $\dot{\omega}_B$ を算出する式に変形できる。式 (15) を時間積分すると、バット座標系 R_B について表した任意の瞬間のバットの角速度 ω_B は以下のように算出することができる。

$$\omega_B(t_f) = \omega_B(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} I_B^{-1} (C_B + \tilde{r}_B F_B^H - \tilde{\omega}_B I_B \omega_B) dt$$

$$= \boldsymbol{\omega}_B(t_i) + \underbrace{\int_{t_i}^{t_f} \mathbf{I}_B^{-1} \mathbf{C}_B dt}_{\boldsymbol{\omega}_B^C} + \underbrace{\int_{t_i}^{t_f} \mathbf{I}_B^{-1} \tilde{\mathbf{r}}_B \mathbf{F}_B^H dt}_{\boldsymbol{\omega}_B^F} - \underbrace{\int_{t_i}^{t_f} \mathbf{I}_B^{-1} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_B \mathbf{I}_B \boldsymbol{\omega}_B dt}_{\boldsymbol{\omega}_B^{GY}} \quad (16)$$

式 (16) より, $\boldsymbol{\omega}_B(t_f)$ は 4 つの項 ($\boldsymbol{\omega}_B(t_i)$: スイング開始時の角速度, $\boldsymbol{\omega}_B^C$: 両手トルクによる角速度, $\boldsymbol{\omega}_B^F$: 両手合力のモーメントによる角速度, $\boldsymbol{\omega}_B^{GY}$: ジャイロ効果による角速度) で構成されていることが分かる. この $\boldsymbol{\omega}_B(t_f)$ によって生じる角変位を算出するため, 谷中ら (2014) と同様の方法を用いて, $\boldsymbol{\omega}_B(t_f)$ をカーダン角 $\boldsymbol{\theta}$ で表す. $\boldsymbol{\theta}$ は, \mathbf{R}_G と方位が一致する座標系 $\mathbf{R}_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ を Z_0 軸まわりに ψ 回転させ, この回転後に得られる座標系 $\mathbf{R}_1 (X_1, Y_1, Z_1)$ を Y_1 軸まわりに θ 回転させ, さらにこの回転後に得られる座標系 $\mathbf{R}_2 (X_2, Y_2, Z_2)$ を X_2 軸まわりに ϕ 回転させて算出した. このとき, $\boldsymbol{\theta} (\psi, \theta, \phi)$ は, それぞれバットの水平角, 鉛直角, ローリング角を表しており, これらを時間微分すると, $\dot{\boldsymbol{\theta}} (\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi})$ を得ることができる. $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ を $\boldsymbol{\theta}$ の 3 回目の回転後に得られる座標系 \mathbf{R}_3 から計測したものに座標変換を行い, 全ての和をとることで $\boldsymbol{\omega}_B(t_f)$ は以下のように求めることができる.

$$\boldsymbol{\omega}_B(t_f) = \mathbf{A}_{R_3/R_2}^T \mathbf{A}_{R_2/R_1}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{R_3/R_2}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式 (17) の \mathbf{A}_{R_3/R_2} , \mathbf{A}_{R_2/R_1} は, それぞれ \mathbf{R}_2 について表した \mathbf{R}_3 , \mathbf{R}_1 について表した \mathbf{R}_2 の方位を示す回転行列であり, 各軸の方向を示す単位ベクトル (3×1 の列ベクトル) を 3 つ合わせたもので構成されている. よって, 式 (17) の $\boldsymbol{\omega}_B(t_f)$ は次のようにカーダン角を用いて表すことができる.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_B(t_f) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} \quad (18) \end{aligned}$$

ここで, 式 (18) の右辺の行列とベクトルをそれぞれ \mathbf{S} , $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ とし, $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ を求める式に変形する

と次のようになる。

$$\dot{\Theta} = S^{-1}\omega_B(t_f) \quad (19)$$

また、式 (16) から $\omega_B(t_f)$ は $\omega_B(t_i)$ 、 ω_B^C 、 ω_B^F 、 ω_B^{GY} で構成されていることから、式 (19) は次のように記述することができる。

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= S^{-1}\{\omega_B(t_i) + \omega_B^C + \omega_B^F - \omega_B^{GY}\} \\ &= S^{-1}\omega_B(t_i) + S^{-1}\omega_B^C + S^{-1}\omega_B^F - S^{-1}\omega_B^{GY} \end{aligned} \quad (20)$$

したがって、式 (20) を時間積分することで、バットの角速度を構成する各項が生み出したカーダン角（バット角度）を以下のように算出することが可能となる。

$$\begin{aligned} \Theta(t_f) &= \Theta(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} S^{-1}\omega_B(t_i)dt + \int_{t_i}^{t_f} S^{-1}\omega_B^C dt + \int_{t_i}^{t_f} S^{-1}\omega_B^F dt - \int_{t_i}^{t_f} S^{-1}\omega_B^{GY} dt \\ &= \Theta(t_i) + \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_i \\ \theta_i \\ \psi_i \end{bmatrix}}_{\textcircled{10}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_C \\ \theta_C \\ \psi_C \end{bmatrix}}_{\textcircled{11}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_F \\ \theta_F \\ \psi_F \end{bmatrix}}_{\textcircled{12}} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\phi_{GY} \\ -\theta_{GY} \\ -\psi_{GY} \end{bmatrix}}_{\textcircled{13}} \end{aligned} \quad (21)$$

式 (21) の $\Theta(t_i)$ はスイング開始時のバット角度であり、他項はそれぞれ⑩スイング開始時のバットの角速度、⑪両手トルク、⑫両手合力のモーメント、⑬ジャイロ効果によって生じるバット角度の変化量を示す。本節では以上に示した①～⑬を力-偶力系の各成分が生み出したヘッドスピードとバット角度として扱った。

2.6 ヘッドスピードとバット角度に対する力-偶力系の貢献度

式 (3) から得られる各成分が生み出すヘッドスピードを全成分が生み出すヘッドスピードで除すことにより、スイング開始からインパクトまでに増加したヘッドスピードに対する各成分の割合を貢献度 (%) として算出した。バット角度においても、式 (21) の各成分を全成分の和で除すことにより、インパクト時のバット角度に対する力-偶力系の各成分の貢献度 (%) を算出した。

2.7 データ分析

本節ではインパクトの 0.3 秒前をスイング開始、インパクト時を 0 秒と定義し、スイング開始からインパクト時までを分析範囲とした。計測された分析範囲の反射マーカの座標値は、残差分析によって最適遮断周波数を決定 (11.2~31.2Hz) し、4 次のバターワース型ローパスデジタルフィルタによって平滑化した (Winter 1990)。なお、打撃動作ではインパクト時にバットの加速度が急激に変化するため、インパクト前後の座標値が不連続となる。このようなデータを平滑化するとインパクト付近の座標値に歪みが生じてしまうことから、本節ではインパクト直前 10 フレームの座標値にフィットする 3 次の近似多項式を用いてインパクト後の座標値 20 フレーム分を補外してから平滑化することとした (Giakas et al. 1998)。また、左打者のデータは全て右打者とみなされるように座標値を変換した。

ヘッドスピードとバット角度に対する力-偶力系の貢献度は、平均値と標準偏差で表した。また、スイング中の力-偶力系の各成分、およびそれらが生み出したヘッドスピードとバット角度 (水平角, 鉛直角) の変化は、スイング開始からインパクトまでをフレーム毎に平均値として表した。ローリング角は打撃動作においてバットヘッドの位置に影響を及ぼさないことから、打者は意識的にこの角度をコントロールしていないと仮定し、ローリング角に対する力-偶力系の各成分の貢献度は分析から除外した。

3. 結果

3.1 打者の両手がバットに作用させた力-偶力系

図 3-1-3 にスイング座標系 R_s からみたバットに作用した力-偶力系の各成分の変化を示した。バット長軸方向の両手合力 Fx_s^H は、-0.2 秒を過ぎてから負の方向に増加し、インパクト時には約-900N に達した。これに対して、ヘッド加速方向とスイング回転軸方向の両手合力 (Fy_s^H , Fz_s^H) は-0.1 秒付近から、それぞれ負の方向と正の方向に増加したが、両成分ともにインパクトまで±50N 未満を維持した。両手トルクのスイング軌道制御の成分

(Ys 成分) は、スイング開始から負の方向に増加し、インパクトまで負の値を示した。また、スイングの角加速成分 (Zs 成分) はスイング開始から正の方向に増加し、-0.05 秒付近までは正の値であったが、その時点を過ぎてからインパクトまでは負の値を示した。両手合力のモーメントのスイング軌道制御の成分 (Ys 成分) は、スイング開始からインパクト直前まで正の方向に増加し続けたのに対して、角加速成分 (Zs 成分) はスイング開始から-0.1 秒付近まで負の値を示し、それ以降は正の値に転じた。ジャイロ効果のスイング軌道制御の成分 (Ys 成分) は、-0.1 秒からインパクトまで一貫して正の方向に増加したが、ローリングと角加速の成分 (Xs, Zs 成分) はスイング中ほぼ 0N・m であった。また、両手トルクと両手合力のモーメントのローリング成分 (Xs 成分) も 0N・m を維持していた。

3.2 ヘッドスピードとバット角度に対する力-偶力系の各成分の貢献度

インパクト時におけるヘッドスピードに対して、バットの重心速度 V_{CG} を生み出す成分 (並進効果) の貢献度は、スイング開始時の重心速度が $3 \pm 1\%$ 、 Fx_S^H が $70 \pm 4\%$ 、 Fy_S^H が $-4 \pm 2\%$ 、 Fz_S^H が $-3 \pm 1\%$ 、重力が $0 \pm 1\%$ であり、バット重心に対するヘッド速度 $V_{BH/CG}$ を生み出す成分 (回転効果) の貢献度は、スイング開始時の角速度が $1 \pm 1\%$ 、両手トルクが $25 \pm 10\%$ 、両手合力のモーメントが $7 \pm 10\%$ 、ジャイロ効果が $0 \pm 0\%$ であった (図 3-1-4a)。並進効果が生み出したヘッドスピードの経時変化をみると、バット長軸方向の両手合力 Fx_S^H に起因するヘッドスピードは-0.15 秒を過ぎてから正の方向に急増し、インパクトまで増加し続けたが、他の成分に起因するヘッドスピードはほとんど増減しなかった (図 3-1-5a)。回転効果が生み出したヘッドスピードの経時変化においては、両手トルクに起因するヘッドスピードはスイング開始直後からインパクトに向けて正の方向に増加し、インパクト直前で僅かに減少した (図 3-1-5b)。一方、両手合力のモーメントに起因するヘッドスピードは、スイング開始直後から負の方向に増加し、-0.1 秒を過ぎた時点から正の方向に増加した。また、スイング局面を通してスイング開始時の角速度とジャイロ効果に起因するヘッドスピードは両方とも 1m/s 未満を維持していた。

スイング開始からインパクトまでに変化したバット角度に対する力-偶力系の各成分（スイング開始時の角速度，両手トルク，両手合力のモーメント，ジャイロ効果）の貢献度は，水平角ではそれぞれ $-2\pm 5\%$ ， $209\pm 43\%$ ， $-121\pm 40\%$ ， $13\pm 8\%$ ，鉛直角ではそれぞれ $37\pm 26\%$ ， $-85\pm 213\%$ ， $242\pm 191\%$ ， $-94\pm 62\%$ であった（図 3-1-4b）．各成分が生み出した水平角の経時変化では，両手トルクに起因する角変位はスイング開始からインパクトまで正の方向に増加したのに対して，両手合力のモーメントに起因する角変位は負の方向に増加し続けた（図 3-1-6a）．また，スイング開始時の角速度とジャイロ効果に起因する角変位の増減はほとんどみられなかった．鉛直角においては，スイング開始時の角速度と両手合力のモーメントに起因する角変位はスイング開始からインパクトまで正の方向に増加し続けた（図 3-1-6b）．一方で，ジャイロ効果に起因する角変位は -0.1 秒付近からインパクトに向けて負の方向に増加した．また，両手トルクに起因する角変位はスイング開始から負の方向に増加し， -0.1 秒を過ぎた時点からインパクトに向けて僅かに正の方向に増加した．

4. 考察

本節の目的は，野球打撃におけるインパクト時のバットのヘッドスピードと角度（水平角，鉛直角）に対して，打者の両手部がバットに加えた力系の各成分が生み出す貢献度を明らかにすることであった．その結果，インパクト時のヘッドスピードは，打者がバット長軸方向に加えた両手合力が約 70% を生み出していることが明らかとなった．また，残りの約 30% のヘッドスピードは，スイング軌道面上でバット長軸を回転させる両手トルクと両手合力のモーメントが，それぞれ 25% と 7% を生み出していたが，重力やジャイロ効果に起因するヘッドスピードは 1% 程度の貢献しかもたらしていなかった（図 3-1-4a）．一方，インパクト時のバットの水平角は両手トルクによってもたらされており，鉛直角は両手合力のモーメントによってもたらされていることが明らかとなった（図 3-1-4b）．

4.1 両手合力の作用点の影響と算出値の妥当性

本節では、両手合力が両手の中間点に作用すると仮定（グリップエンドの厚さが約 0.02m、片手の手幅が約 0.1m であると仮定）し、両手合力の作用点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 0.12m 離れた位置に設定した。しかしながら、実際の作用点は両手部の手幅内で分布していると考えられるため、グリップエンドから約 0.02～0.22m の間で変動している可能性がある。そこで、モデリングの誤差範囲を明らかにするために、両手合力の作用点がグリップエンドから 0.02m (0.12m - 0.1m) と 0.22m (0.12m + 0.1m) に位置する際に、本節で算出した結果（両手トルクと両手合力のモーメントやそれらが生み出すヘッドスピードとバット角度）をどれだけ反映し得るかを検証した。その結果、スイング局面におけるスイング座標系 R_S からみた両手トルクと両手合力のモーメントは、角加速成分 (Z_S 成分) が最大で $\pm 8.3\text{N}\cdot\text{m}$ (0 秒時) の差がみられたものの、類似した変化パターンが確認された (図 3-1-7)。また、インパクト時のヘッドスピードに対する貢献度は $\pm 2\%$ 、バットの水平角に対する貢献度は $\pm 27\%$ 、鉛直角に対する貢献度は $\pm 55\%$ の差がみられたが、貢献度の平均値の符号は本節の分析モデルから算出したものと同じであった (図 3-1-8)。これらのことから、両手合力の作用点の位置がスイング中に両手部の手幅内で変動したとしても、本節で設定したモデルから算出した結果を歪めるものではないと考えられる。

本節で導出した式から算出したインパクト時におけるヘッドスピードは $33.8 \pm 1.5\text{m/s}$ であった。また、スイング開始からインパクトまでに変化したバット角度は、水平角が $248 \pm 17^\circ$ 、鉛直角が $55 \pm 14^\circ$ であり、バットは右打者を頭上からみても投手側からみても反時計まわりに回転していた。しかし、導出した式から算出される値（算出値）には、計算過程における積分誤差が含まれることと、積分する時系列データのサンプリング周波数の大きさに影響されることが予想される。そのため、ヘッドスピードについてはバットヘッドの座標値を時間微分することによって算出した値を計測値、式 (3) から算出した値を算出値として、各試技についてそれぞれの時系列データの相互相関係数、および両データ間

の差を求めた。また、バット角度についても基準座標系 R_G に対するバット座標系 R_B の方位を表すカーダン角を計測値，式 (21) から算出したカーダン角を算出値として，ヘッドスピードと同様に両データを比較した。その結果，ヘッドスピードとバット角度の計測値の時系列データと算出値の時系列データとの相互相関係数は全ての試技で 0.999 以上 ($p < 0.01$) であった。また，これらの時系列データの差の絶対値は，全被験者において最大でもヘッドスピードが 0.1m/s 未満，バット角度が 0.3°未満であり，これらの差は計測値に対して 1%以内であった (図 3-1-9)。以上のことから，本節で用いたデータ処理とデータセットは妥当であり，この方法論によって求めたヘッドスピードとバット角度の算出値は計測値を正確に記述できていたと考えられる。

4.2 ヘッドスピードが生み出される要因

インパクト時のヘッドスピードに最も大きく貢献したのは両手合力のバット長軸方向成分 Fx_S^H で，その値は-0.15 秒付近からインパクトまで一貫して負の方向に増加し続けた。その結果， Fx_S^H が生み出すヘッドスピードもこの増加に同期するように急増し，インパクト時には 23.6m/s (全体の約 70%) に達した (図 3-1-3a, 3-1-5a)。これは，打者がスイング開始時からインパクトの瞬間までバットをヘッドからグリップエンドの方向に引っ張り続けることによって，ヘッドスピードの大半を生み出していたことを示すものである。打者の頭上からバットの運動を観察すると，スイングが開始されてからバット重心は円弧を描きながら加速し，インパクトを迎えていることが分かる (図 3-1-10)。曲線軌道で加速している物体には曲線の接線方向と向心方向に加速度が生じる。本節においてバット長軸をグリップエンド側に引っ張る両手合力がバットヘッドの加速に貢献したのは， Fx_S^H が向心方向だけではなく接線方向にも作用することによってバット重心が加速したことに起因するものである (図 3-1-11)。また， Fx_S^H の向心成分は接線方向に加速するバットの重心運動を曲線軌道にのせ，インパクトに向けてバットヘッドを適切な位置に移動させるために不可欠なものであると推察される。つまり， Fx_S^H はバット重心の曲線軌道を維持する

ための向心力としての機能を持ちながら、バット重心を加速させヘッドスピードを増加させていたと考えられる。

Fx_5^H に次いで大きな貢献度を示した両手トルクは、スイング開始直後からスイング前半(-0.1 秒付近まで)にかけてバットヘッドの加速に貢献したが、その後は僅かに減速させる働きを示した(図 3-1-5b)。打者の左右各手がバットに加えた力を計測した研究(小池と阿江 2012)によると、ヘッド加速方向(Y_s 成分)の力は、右打者の場合、スイングが開始してから左手側は負の方向に増加し、右手側は正の方向に増加していくが、インパクト直前ではどちらの力も減少することが報告されている。左右各手がバットに加えた 2 力の偶力として機能を考えると、この結果は、偶力がスイング開始から増加していくものの、インパクト付近では減少することを示すものである。小池(2004)の研究においても、左右各手ともにモーメントの角加速成分(Z_s 成分)はスイング開始から増加した後インパクトが近づくとつれブレーキとして機能することが示されている。バットの把持位置のスピードを計算したところ、スイング前半(-0.3~-0.1 秒)の平均値が 1.8m/s であったのに対して、スイング後半(-0.1~0 秒)では 7.7m/s であった。以上のことから、打者の手部のスピードが比較的低いスイング前半において、打者は両手トルクによってバットを加速させることができたが、スピードが高くなるスイング後半では、偶力によってバットをさらに加速させることが困難になったものと考えられる。

インパクト時のヘッドスピードに対して 7%の貢献を示した両手合力のモーメントは、-0.1 秒直後までヘッドスピードを減少させる働きをしたが、それ以降はバットを加速させる働きを示した(図 3-1-5b)。両手合力は、スイング全体を通じてほぼヘッドからグリップエンドの方向に作用していたが、-0.1 秒付近までは僅かにヘッド加速方向の成分(Y_s 成分 >0)を有していた(図 3-1-3a)。この成分の両手合力は投手方向へのバットの回転を妨げる方向にモーメントを生じさせるため、ヘッドスピードに対して負の貢献をもたらしたと考えられる。しかし、両手合力のモーメントはインパクト直前(-0.1 秒以降)でヘッドスピードに対して正の貢献をもたらした。その要因はこの局面において両手合力がヘッド

加速方向とは逆向き (Y_s 成分 < 0) に作用した (図 3-1-3a) ことにより, バットの回転を促進する方向へのモーメントが生じたためであると考えられる. つまり, インパクト直前にはバットの重心運動に対してブレーキ効果を生じさせる力がバットスイングの角加速をもたらし, その結果としてヘッドスピードを増加させたのである. したがって, 両手合力のモーメントがスイング全体として 7%の貢献度をもたらすことになったのは, このモーメントによるインパクト直前におけるヘッドスピードに対する正の貢献がそれまでに蓄積された負の貢献を上回ったためであると考えられる.

4.3 バット角度の規定因子

インパクト時のバットの水平角は主に両手トルクによって生み出されており, この成分は水平角に対して約 200%の貢献をもたらしていた (図 3-1-4b). 前項では, バット長軸方向に引っ張る両手合力は単独でもバットヘッドを十分に加速させられることを示した. しかしながら, 両手合力によるモーメントは打撃とは反対方向へバットを回転 (打者を頭上からみてバットを時計まわりに回転) させる働きを有するため (図 3-1-12), 水平角に対して負の貢献 (-121%) をもたらす. したがって, このモーメントだけではスイング開始からインパクトまでにバットを通常の打撃ポイントと考えられるホームベース上付近まで回転させることができない. つまり, 両手トルクが水平角に対して 100%以上の貢献度をもたらしたのは, 通常の打撃ポイントまでバットを回転させるために両手合力のモーメントによる負の貢献を上回る正の貢献をもたらすことが必要であったためであると推察される.

バットの鉛直角は, 両手合力のモーメントが主な原動力となって生み出されていた. これは, 両手合力のモーメントがグリップエンドに対してバットヘッドを下方へ移動させる方向 (バット長軸と基準座標系の Z_G 軸からなる鉛直面である X_B - Z_G 平面において, 投手側からみて反時計まわり) に回転させる働きを有したことに起因する (図 3-1-12). また, 右打者のスイング軌道を左打席側から観察すると, バット重心は反時計まわりに曲線軌道

を辿っていることが確認できる (図 3-1-6) . このことから, X_B-Z_G 平面上におけるバットの重心運動において, 両手合力はバット重心を向心方向へ加速させる役割と接線方向へ加速させる役割をもつことが分かる. この平面上において, 両手合力の向心成分はバットヘッドを下方へ移動させる方向に回転させ, 接線成分はバットヘッドを上方へ移動させる方向に回転させる働きを有する. すなわち, 両手合力のモーメントが鉛直角を生み出したのは, X_B-Z_G 平面において両手合力の向心成分がもたらす回転効果 (正の貢献) が, 接線成分がもたらす回転効果 (負の貢献) を上回ったためであると考えられる. 両手合力のモーメントが鉛直角に対して 242%の正の貢献を示した一方で, 両手トルクとジャイロ効果は負の貢献を示した (図 3-1-4b) . つまり, 両手トルクとジャイロ効果は, バットヘッドを下方移動させる方向への回転にブレーキをかける働きを有していたのである. これは, 両手合力のみがバットに作用した場合, そのモーメントによってバットヘッドが通常よりも下がり過ぎてしまうことを意味する. 打撃の指導現場では, インパクトにおいてバットヘッドもしくは手首を立ててスイングするように指導される (篠塚 2013) が, この指導は適切な鉛直角でインパクトを迎えるために両手トルクによってバットヘッドの降下を抑制する働きを促すものと考えられる. また, 鉛直角に対して両手トルクと同程度の負の貢献をもたらしたジャイロ効果は, 軸対象物体であるバットが長軸 (X_B 軸) まわりに自転しながらスイングする際に, バット長軸が円錐面にそって歳差運動しようとする効果のことである. 図 3-1-13 のように鉛直上向きの角運動量を有するバットの長軸が鉛直軸に対して 90° の整数倍を除いた角度 (章動) をなすとき, バットは歳差運動をする. しかし, 章動が 90° の整数倍となった場合には角運動量ベクトルをバット長軸に投影した成分 (長軸まわりの角運動量) はゼロとなるため, バット長軸は同一平面上でバットヘッドとグリップエンドの位置がそれぞれ入れ替わるように回転することになる. つまり, バットの角速度ベクトルと角運動量ベクトルが同じ方向を向く際には, ジャイロ効果は消失する. したがって, ジャイロ効果が鉛直角の増大を妨げる貢献をもたらしたのは, 歳差運動によってバット長軸が同一平面上で回転することができずに円錐面に沿って回転したため, バットへ

ッドが下方に移動しにくくなったことが原因であると考えられる。

バットの水平角を生み出す主な成分である両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度は、それぞれ 145～309%と-211～-52%の範囲であり、大きさに違いはあるものの全被験者が同様の傾向を示していた。一方で、鉛直角に対する両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度は標準偏差が大きく、それぞれ-565～217%と-31～681%の範囲であった。この結果は、バット角度を生み出すメカニズムにおいて水平角には被験者間の差はないが、鉛直角は被験者毎に異なっていることを意味する。この理由を力学的に考察するため、両成分の貢献度が対照的であった 2 人の被験者 (sub. A, sub. B) のデータを例に説明する。両者のインパクト時におけるバットの鉛直角は、sub. A が 21°, sub. B が 20°であり、その変化量はそれぞれ 57°と 63°であったことから、両者の鉛直角はほぼ同様の変化をしていたと言える。しかしながら、両手トルクと両手合力のモーメントが生み出した鉛直角は図 3-1-14 のように対照的な変化を示した。このように、両者の鉛直角の変化は類似していたにも関わらず、鉛直角を生み出す回転効果が異なる要因としては、バット長軸に対する両手合力の向きが両被験者で異なっていたためであると考えられる。両手合力のヘッド加速方向とスイング回転軸方向の成分 (Y_s , Z_s 成分) を比較すると、両被験者共にスイング回転軸成分は一貫して正の値を示していたが、ヘッド加速成分は sub. A がスイング開始から-0.1 秒付近まで正の値を示していたのに対して、sub. B はほぼ 0N を維持していた (図 3-1-15)。つまり、sub. A はこの時点までは、スイング軌道面に対して鉛直上向き、かつグリップエンドに対するヘッド速度の方向に両手合力を作用させていたことになる。右打者ではインパクトに向けてバットヘッドはグリップエンドに対して左斜め下方向に移動することから、インパクト直前までは所謂ダウンスイングになっている。そのため、sub. A のように両手合力のヘッド加速成分 (Y_s 成分) が正の方向にグリップ部分に加わった場合、バットの鉛直角の増加を抑制するような回転効果 (グリップエンドに対してバットヘッドを上方へ移動させる効果) が生み出されることになる。したがって、sub. A において、インパクト時の鉛直角に対して両手合力のモーメントが負の貢献度を示したのは、両手合力

のヘッド加速成分 (Y_s 成分) のモーメントによって生じた鉛直角の増加を抑制する回転効果が、スイング回転軸成分 (Z_s 成分) のモーメントによる回転効果 (グリップエンドに対してバットヘッドを下方へ移動させる効果) を上回ったことに起因したと考えられる。一方, sub. B は-0.1 秒付近まで, 両手合力のヘッド加速成分 (Y_s 成分) のモーメントは回転効果を生み出さないため, 両手合力のモーメントによる鉛直角の変化は両手合力のスイング回転軸成分 (Z_s 成分) によって決定される。したがって, sub. B において, 両手合力のモーメントが鉛直角に対して正の貢献度を示したのは, 両手合力のヘッド加速成分 (Y_s 成分) によるモーメントの効果が極めて小さく, スイング回転軸成分 (Z_s 成分) のモーメントによって生じた鉛直角の増加を促進させる回転効果がインパクトまで働き続けたためであると考えられる。

打撃に関する練習やトレーニングの中には, 前腕部の筋を鍛えることにより手関節の発揮トルクの増大を狙ったもの (篠塚 2013) が散見されるが, その理由としては, 現場においてヘッドスピードの高さやスイング軌道のコントロールに対して, 「リストの強さ」が重要視されている (應武 2009) ためと考えられる。しかしながら, 本節の結果, バットのヘッドスピードと鉛直角は, 両手合力とそれに起因するモーメントによって大半が生み出されており, 両手トルクはインパクト時のヘッドスピードの約 4 分の 1 を生み出すものの, インパクト直前ではほとんど貢献しないことが示された。また, 両手トルクは主に水平面上においてバットを投手方向に回転させると共に, インパクトに向けてバットヘッドが下方に移動しすぎないように鉛直角を調整する役割を担っていることが示された。このように, 打者の両手部がバットに加えた力-偶力系において, 両手トルクではなく両手合力がバットの運動に対して支配的であることが明らかになったが, 被験者間で両手合力の向きが僅かに異なるだけで, バットの鉛直角が生み出されるメカニズムに大きな違いがみられた。これらの結果は, バットを加速させ, 水平面上で回転させる技術については打者間で類似しているが, 鉛直方向への回転については多様な技術が存在することを示唆するものであり, この違いが打撃技術の正確性に影響を及ぼしているものと推察される。

野球の試合における打撃のパフォーマンスは、バットを大きく加速させることに加え、その位置や向きを投球されたボールの速さや軌道に合わせて巧みにコントロールすることによって実現される打球の良し悪し（ヒットやホームランになったかどうか）によって決定される。そのため、打撃における最適な動作を普遍的なものとして定義することは困難である。本節では、クローズドスキルとしてのティー打撃を用いた上に、自己評価の高いスイングのみを扱ったことから、規定された環境下における最良のスイングが各打者について引き出せたものと仮定できる。そのため、本節から得られた知見は、投球されたボールのスピードやコース、スイング開始のタイミングの良し悪しなどの影響により無数のバリエーションをもつと考えられる打撃動作の中で、各選手にとって最良のスイング動作の特徴を示すものとなる。さらに、各選手にとっての最良のスイングの力学的な特徴が被験者全員に共通するものであったため、本節の成果はトレーニングや指導において重点を置くべきポイントやバットスイングを微調整するための方法論を提示するものと考えられる。具体的には、ヘッドスピードを高めるためには、スイング局面の中盤からインパクト（ $-0.15\sim 0$ 秒）までバットの長軸方向（グリップエンド方向）へ力を加えてスイングすることが大切であり、そのような力を大きく発揮できるようなトレーニングが効果的であることが示唆できる。また、バット角度のコントロールには、流し打ち（右打者の場合、ライト方向への打撃）を例にして、以下のような方法論を提示できる。流し打ち方向へ高速度の打球が放たれた際のバットの打撃面は $5\sim 25^\circ$ ライト側に向いている（城所ら 2013）ことから、本節の被験者の最良のスイングにおけるインパクト時のバットの水平角（ $-3\pm 6^\circ$ ）を 15° 程度減少させる必要がある。この水平角はインパクト直前 0.01 秒付近の角度（図 3-1-9b）に相当することから、この局面に達する前*からバットに両手トルクを加えないようにスイングし、正の貢献（図 3-1-6a）を減少させることで流し打ちが可能になると考えられる。また、インパクト 0.01 秒前に達する際の両手合力のモーメントによる負の貢献（図

*本研究のデータを用いて、バットに作用する両手合力の大きさや向きは維持したまま、両手トルクを加えないでスイングした際の水平角を計算したところ、水平バット角を流し打ちに適した値にコントロールするには、両手トルクはインパクトの $0.144\sim 0.028$ 秒前（平均： 0.082 秒）から 0 にする必要があることが確認された。

3-1-6a) を増大させるよう、左右各手部が流し打ち方向または投手方向に力を加えるようにスイングすることでも流し打ち方向への打撃が行えると考えられる。このように、コーディネートされた全身運動によって打者が生み出した力学的なアウトプットをバットに加える力系 1 つに集約することにより、バットを加速させ、コントロールするために打者がどのような力をバットに加える必要があるのかを知ることができた。この知見は、逆説的に捉えると、打者にそのような力を発揮させるための方法論やトレーニングを合理的に考案・再考するための根拠となる。各関節運動についての詳細な動作やトレーニング方法を示すことはできないものの、複数関節や全身をコーディネートする **functional training** (ボイル 2007) 等に活かすことにより、トレーニング現場に活用できるものと考えられる。

5. まとめ

野球打撃におけるインパクト時のヘッドスピードは、打者の両手部がバット長軸に対してグリップエンド方向に加えた両手合力の力積によって 70%、両手トルク（両手部による 2 力またはモーメント）の角力積によって 25%が生み出されていた。また、バットの方位変化については、水平角は両手合力のモーメントによる負の貢献を両手トルクによる正の貢献が上回ることによって生み出されており、鉛直角は両手トルクによる負の貢献を両手合力のモーメントによる正の貢献が上回ることによって生み出されていることが示された。

表 3-1 実験に使用したバットの慣性特性.

	Length	Center of gravity	Mass	Moment of inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	
	(m)	(m) ^{*1}	(kg)	I_x	I_y, I_z ^{*2}
Bat-1	0.840	0.557	0.905	4.49.e-04	0.0404
Bat-2	0.850	0.567	0.891	4.42.e-04	0.0334

*1 Distance from the grip-end of the bat.

*2 I_x : Moment of inertia about the longitudinal axis of the bat.

I_y, z : Moment of inertia about the short axis of the bat.

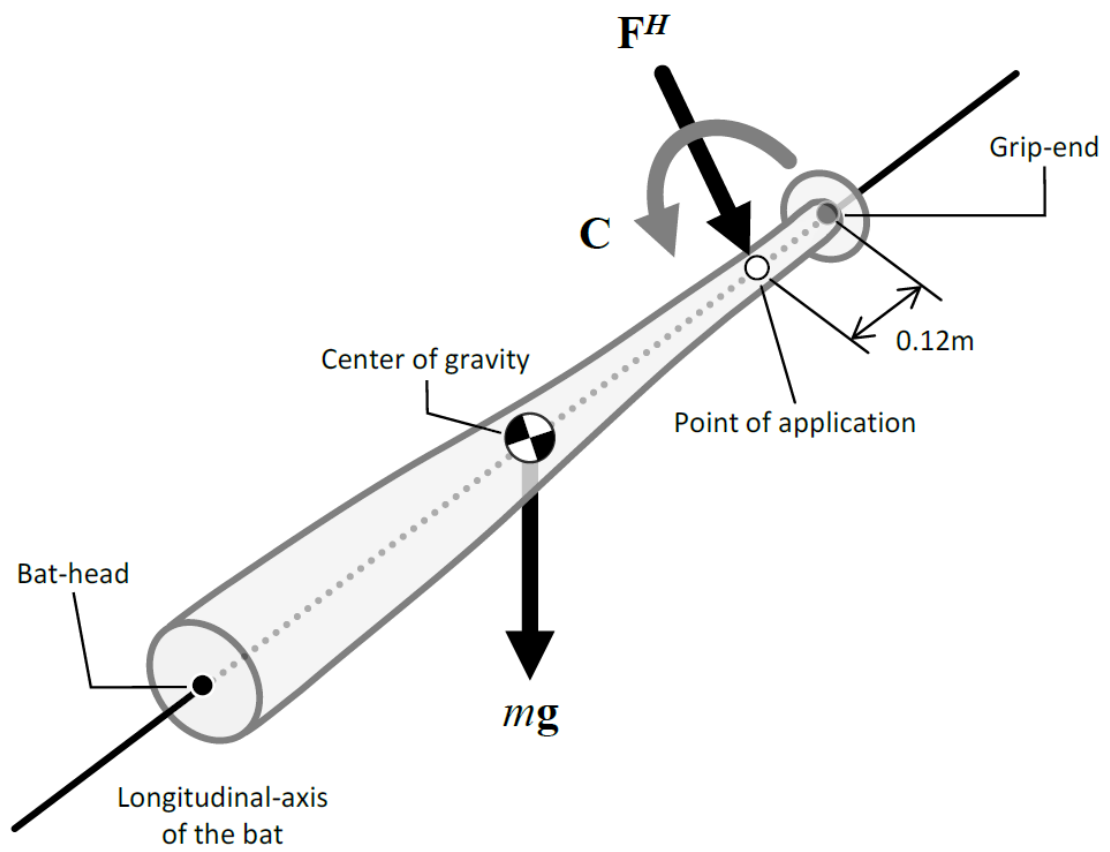


図 3-1-1 スイング中のバットのフリーボディダイアグラム.

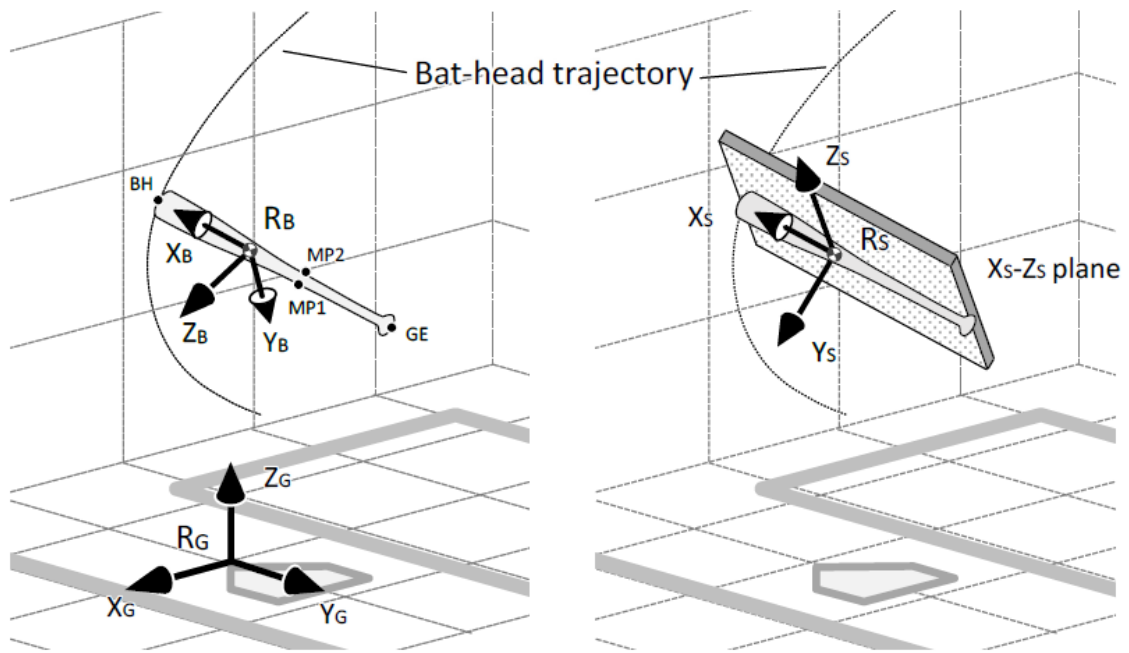


図 3-1-2 座標系の定義.

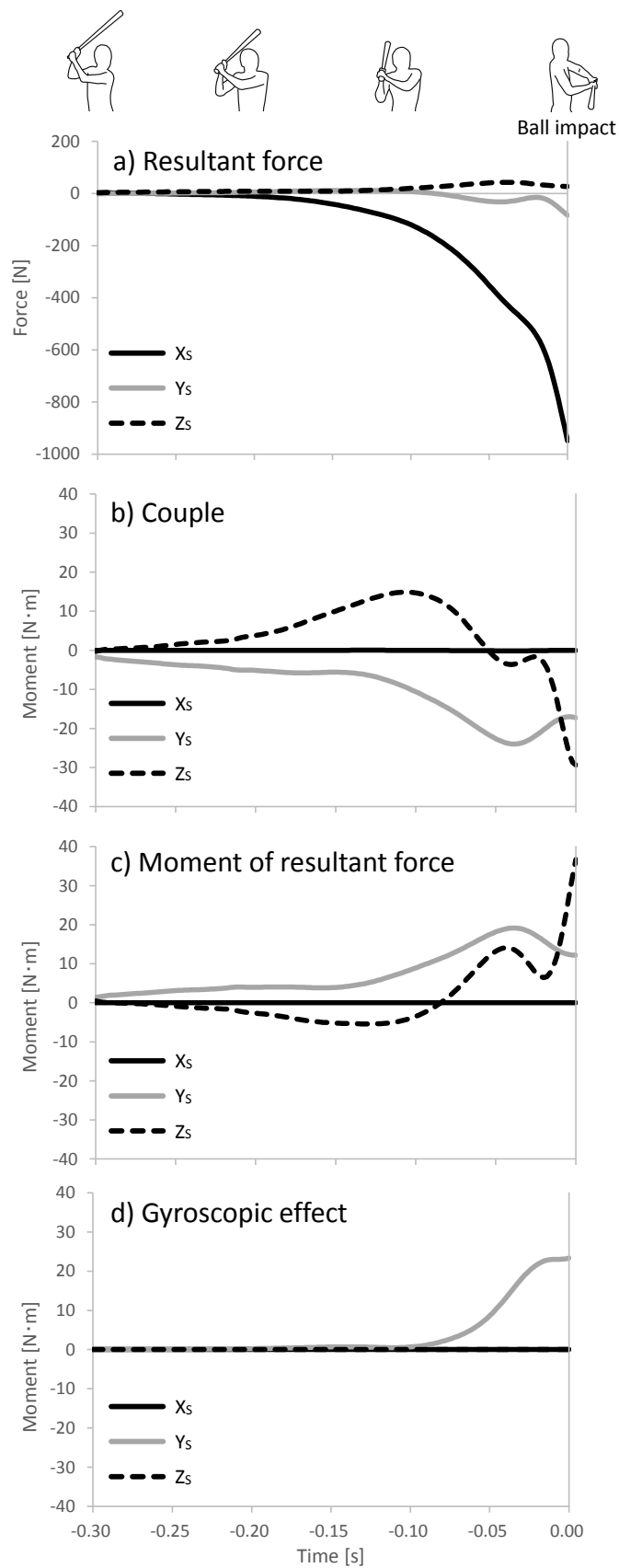


図 3-1-3 スイング座標系から計測した力-偶力系の平均変化パターン.

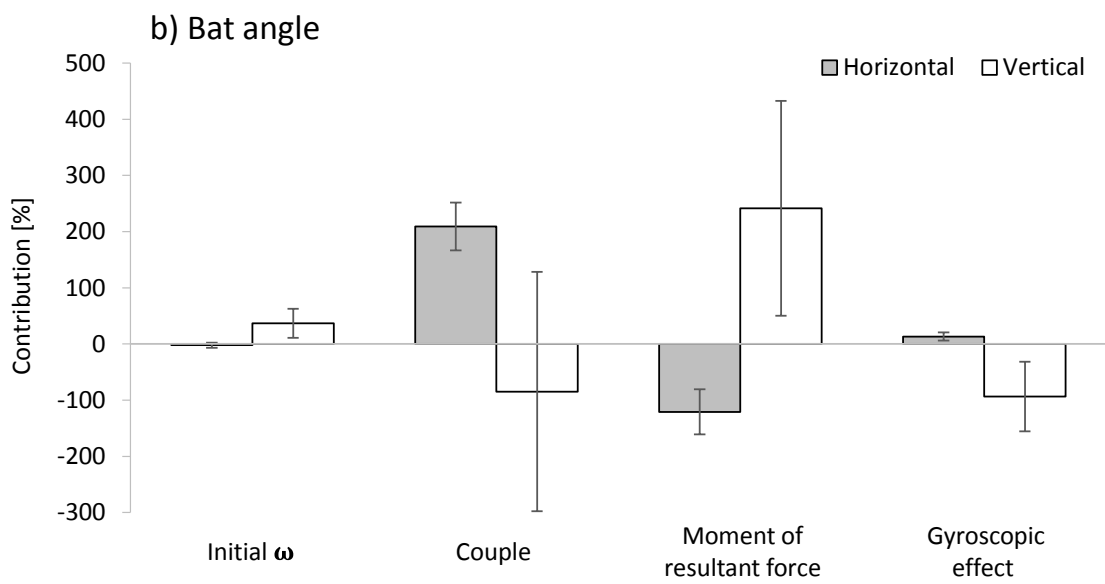
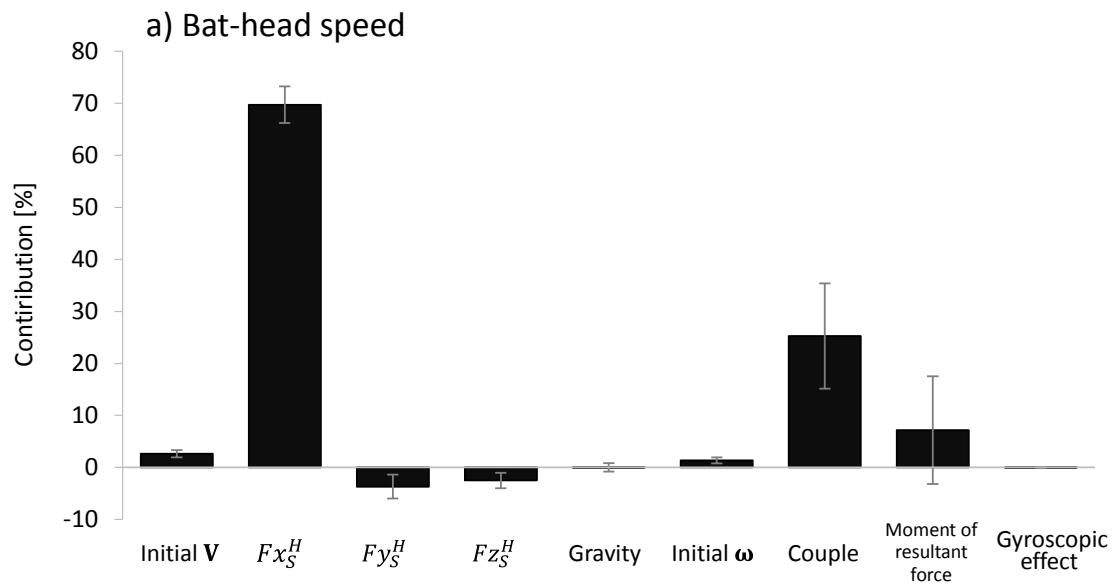


図 3-1-4 ヘッドスピードとバット角度に対する力-偶力系の各成分の貢献度.

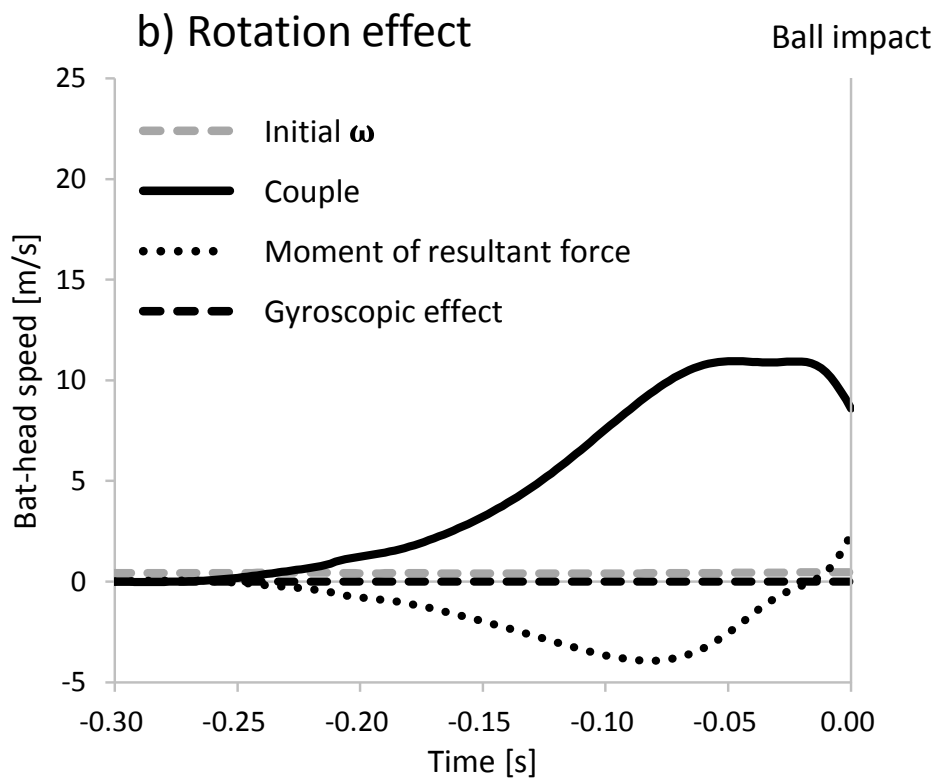
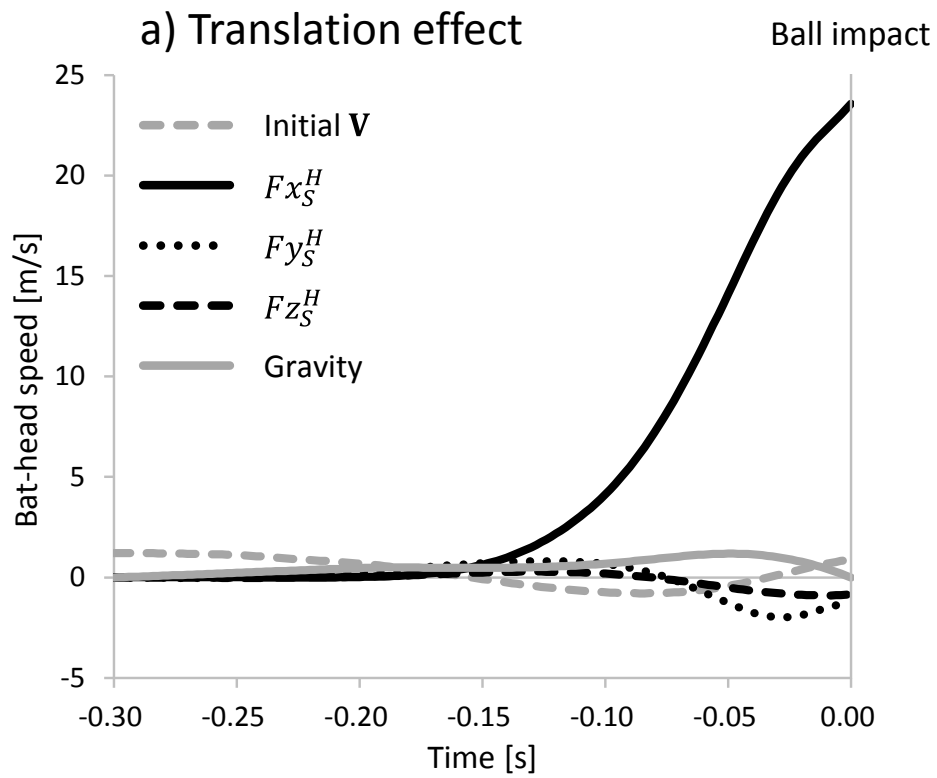


図 3-1-5 カ-偶力系の各成分が生み出したヘッドスピードの平均変化パターン。

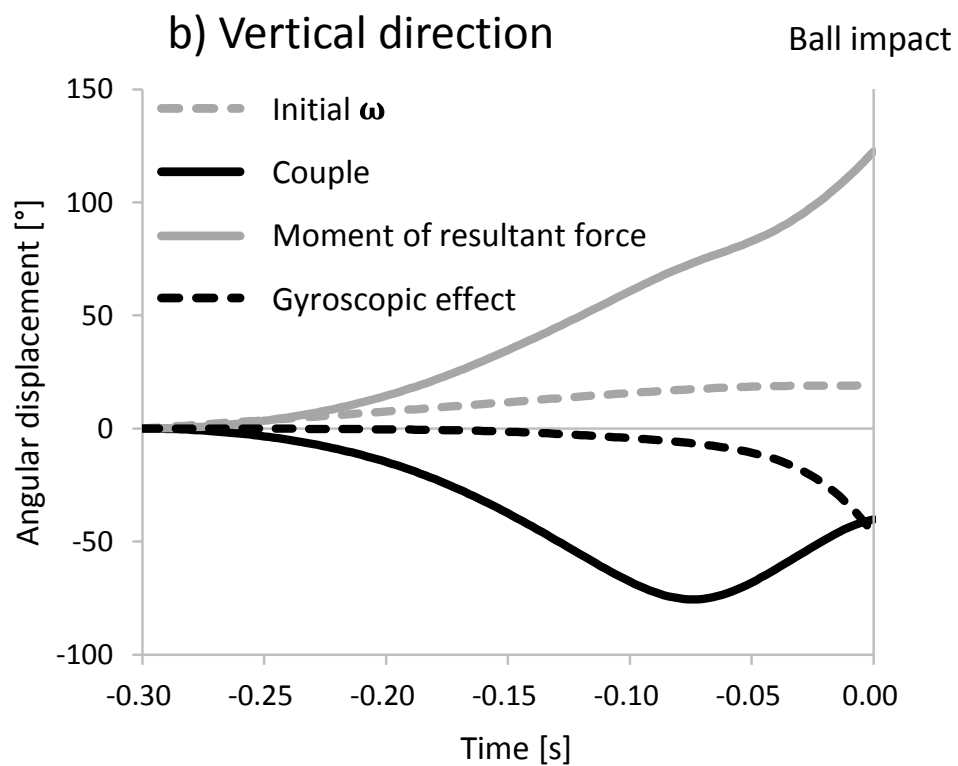
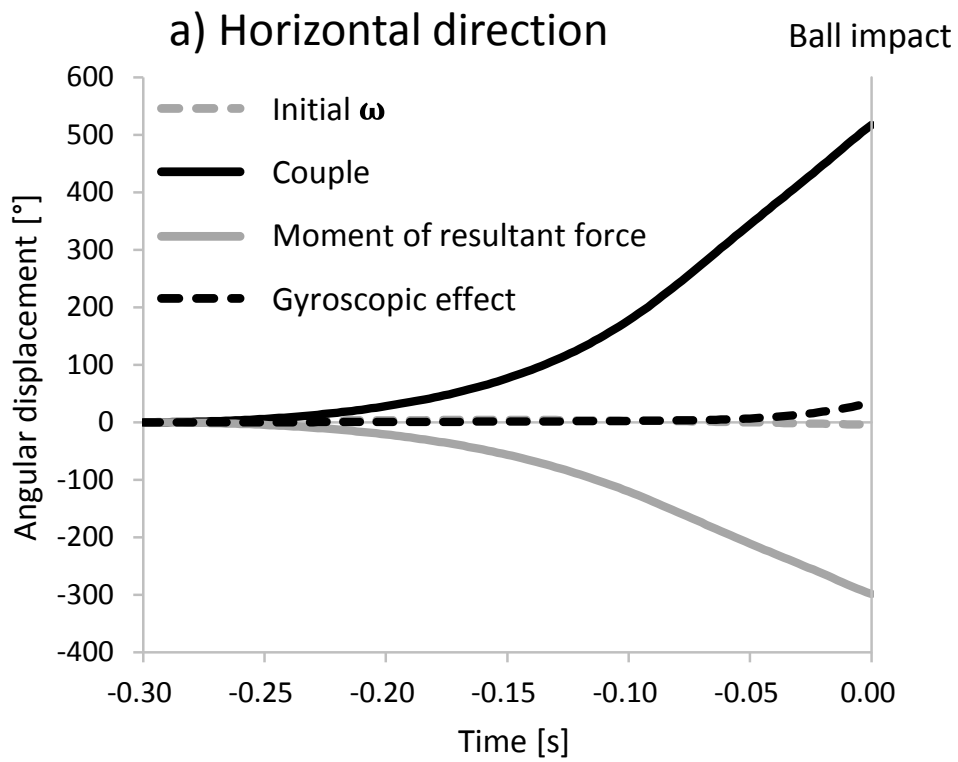


図 3-1-6 カ-偶力系の各成分が生み出したバット角度の平均変化パターン.

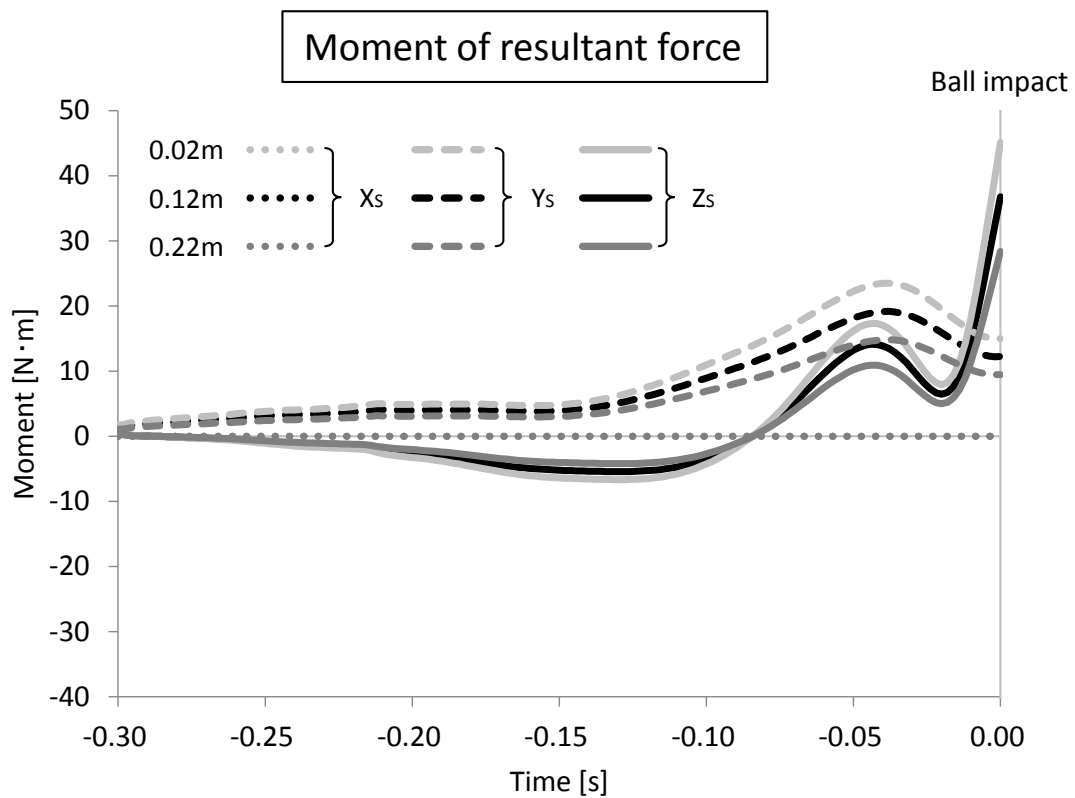
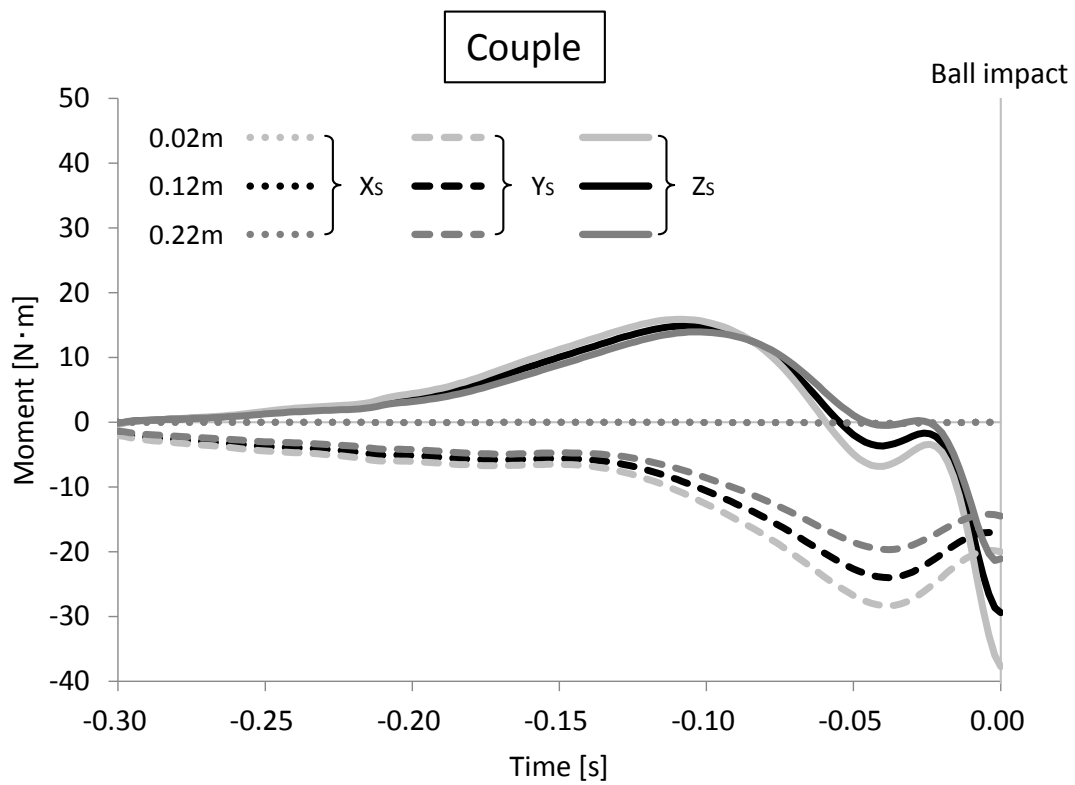


図 3-1-7 両手合力の作用点を変化させた際の両手トルクと両手合力のモーメントの平均変化パターン。

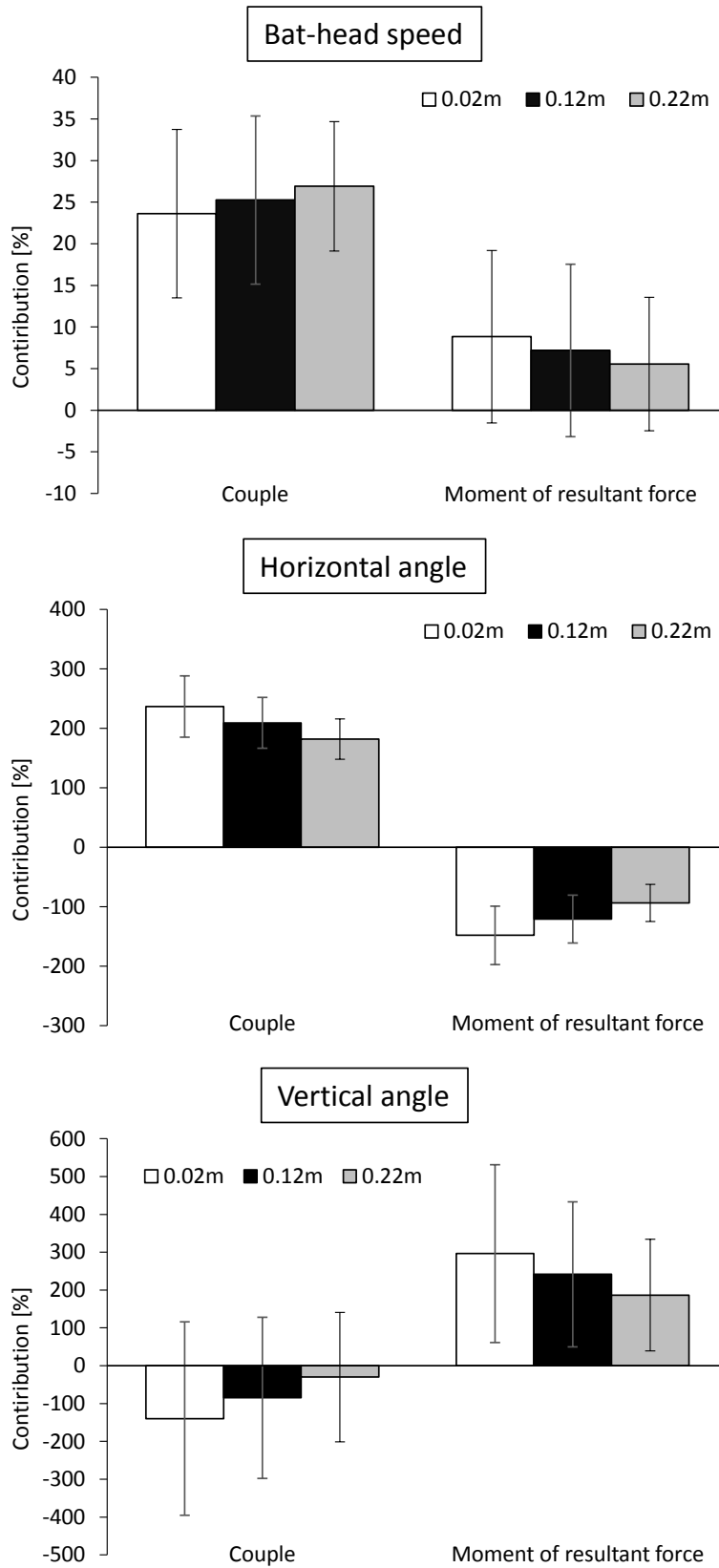


図 3-1-8 両手合力の作用点を変化させた際のヘッドスピードとバット角度に対する両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度への影響.

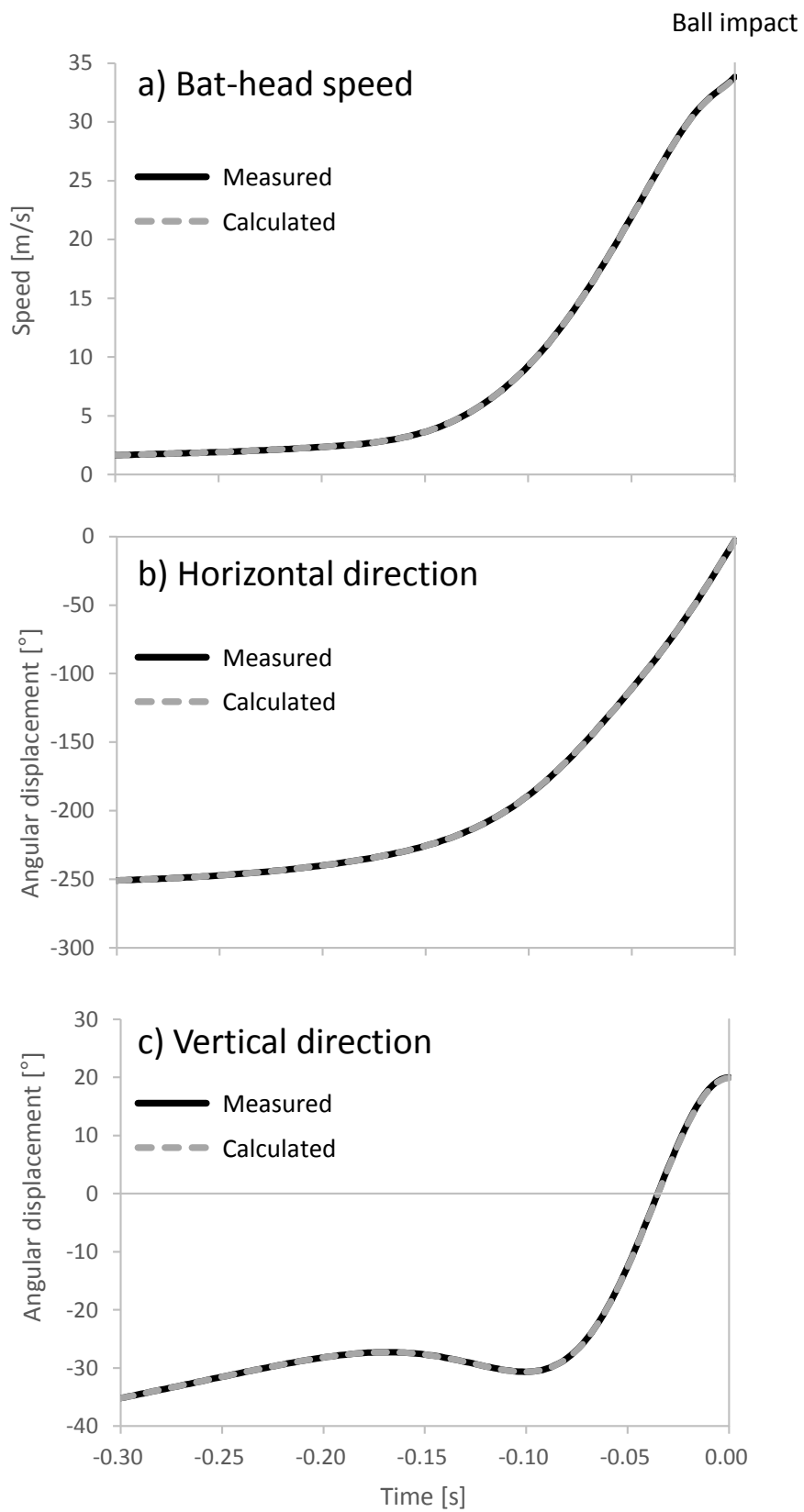


図 3-1-9 ヘッドスピードとバット角度における計測値と算出値の平均変化パターン。

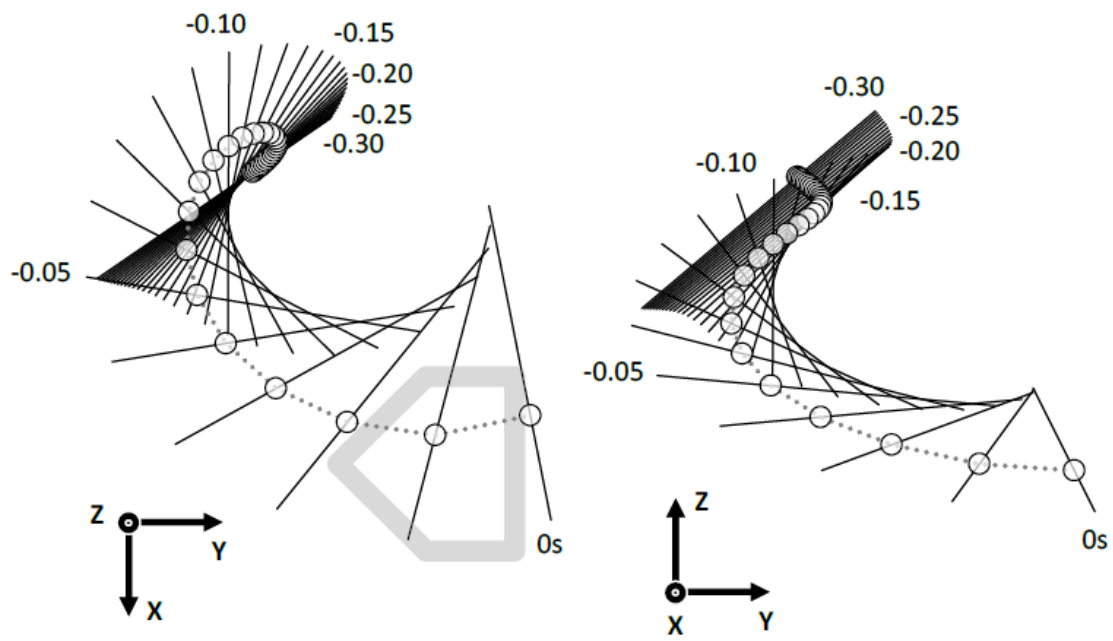


図 3-1-10 XY 平面と YZ 平面からみた 0.01 秒毎のバットスイング軌道の典型例. ○と点線は, それぞれバット重心とその軌跡を示す.

Trajectory of the center of gravity of the bat

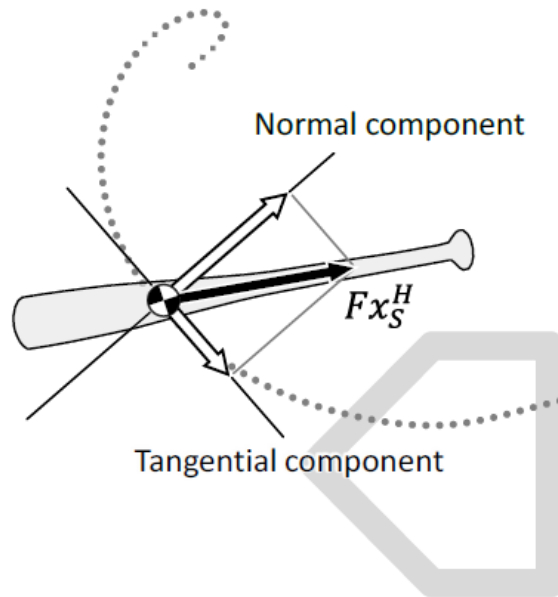
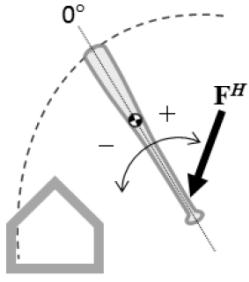


図 3-1-11 バットの長軸方向に作用する両手合力によってバット重心が加速するメカニズムを表した概念図. バット重心は両手合力の接線成分によって加速する.

Overhead view (Horizontal)



Pitcher's view (Vertical)

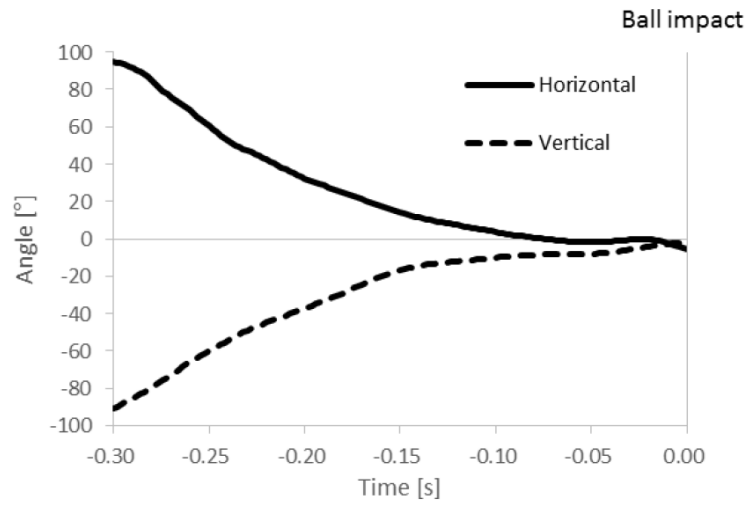
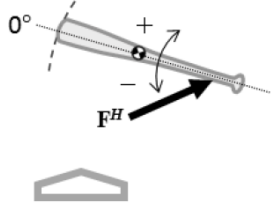
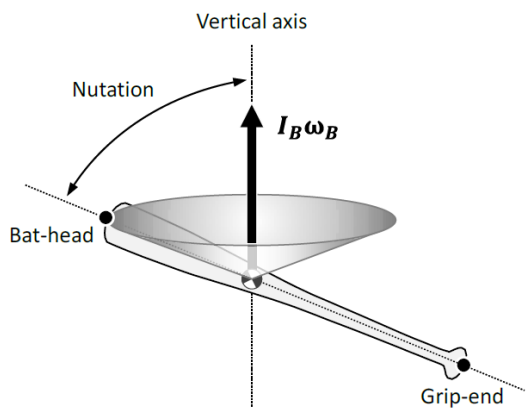


図 3-1-12 バット長軸と両手合力 (F^H) のなす角度の平均変化パターン.

(A) In case that nutation isn't an integer multiple 90° ...



(B) In case that nutation is 90° ...

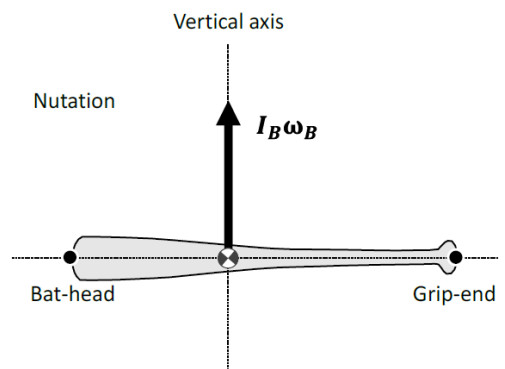


図 3-1-13 角運動量ベクトルとバット長軸との関係, およびその関係がバットの運動に与える効果. (A) はバットが章動角を維持し, 歳差運動することを表し, (B) はバットが1軸まわりに回転することを表す.

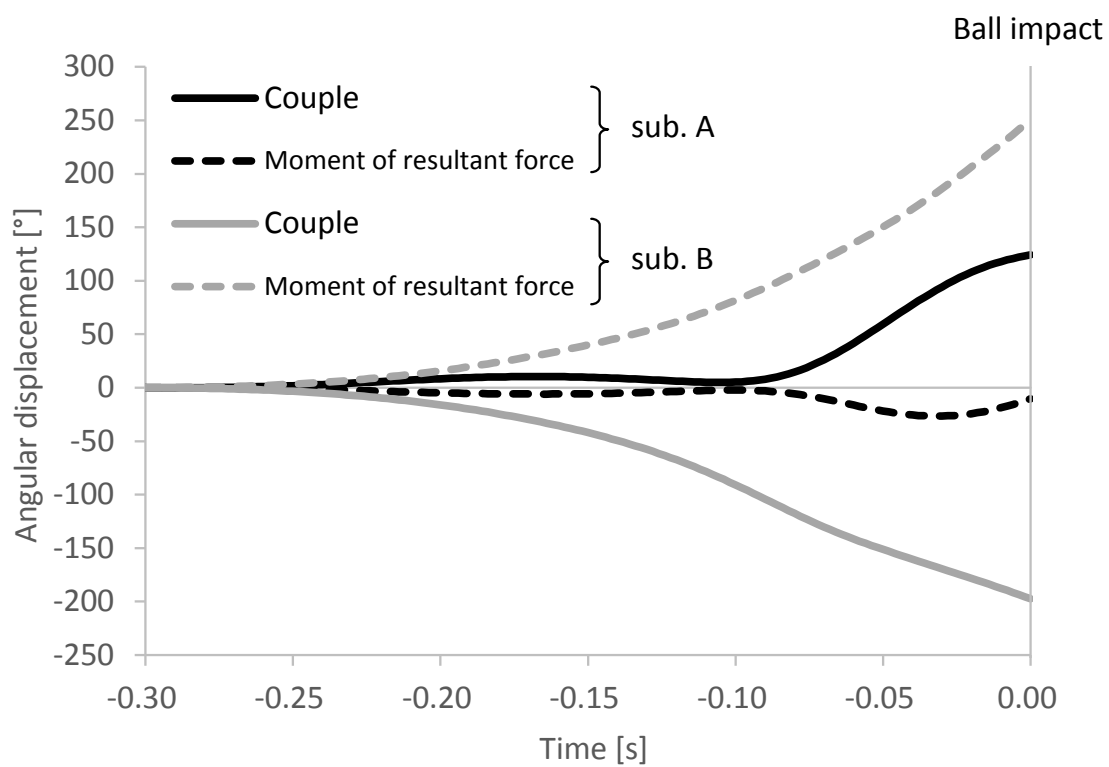


図 3-1-14 2名の被験者の両手トルクと両手合力のモーメントが生み出すバット鉛直角の変化.

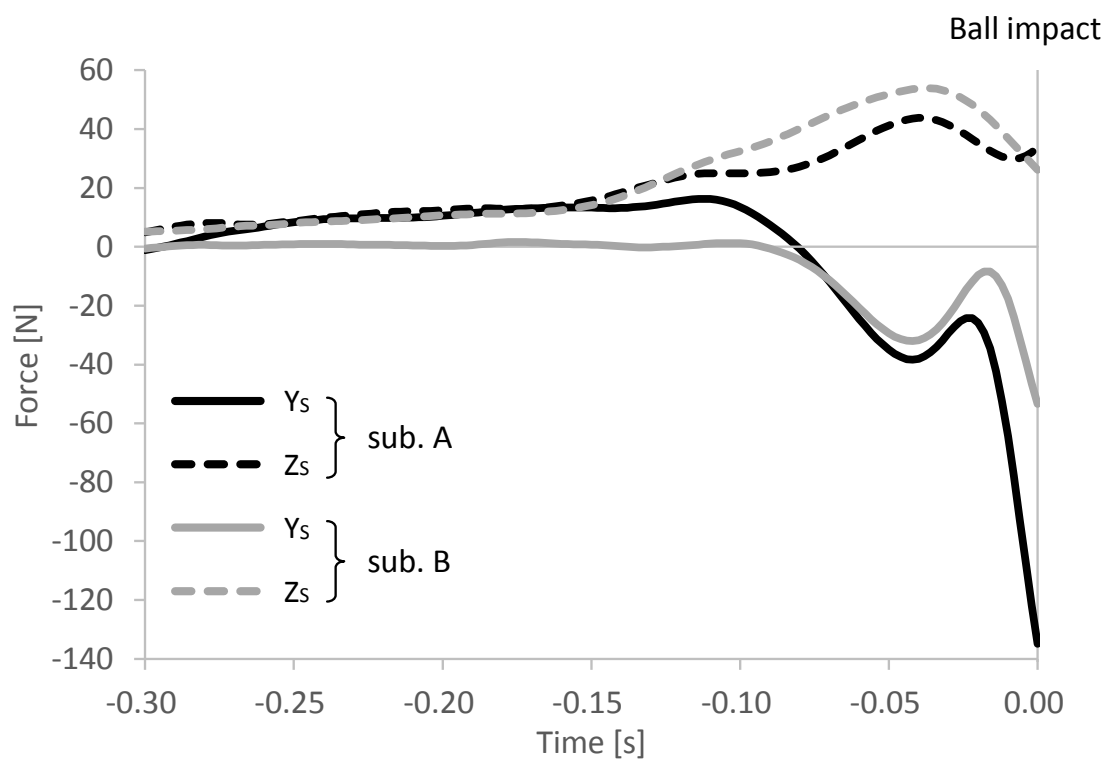


図 3-1-15 2名の被験者のスイング座標系から計測した両手合力のY成分とZ成分の変化.

第2節 左右方向への打ち分けを可能にするスイング軌道の制御

1. 緒言

野球では、ホームベースを基準にフェアグラウンドを左右に二分した際、打者のバッターボックス側のフィールドへ打球を放つことを「引っ張り：same-field hitting」、その反対側へ打球を放つことを「流し打ち：opposite-field hitting」と呼ぶ（McIntyre and Pfautsch 1982）。打者には、試合において走者の有無や相手チームの守備隊形に応じて左右方向に打球を打ち分ける技術が求められる。打ち分けを行うことは、大量得点を奪取するために重要であり、投げられたボールを打者が自由に打撃するよりも相手野手の間を狙って打撃した方が、併殺率を減少させ、得点圏に多くの走者を進めることができると考えられる（功刀 1999）。打撃の指導書によると、左右方向への打球の打ち分けはバットスイングの開始のタイミングを変えることや、バットの打撃面を打ちたい方向に向けることが重要であると示されている（篠塚 2013）。また、打球方向によって打撃動作が異なり、流し打ちを行う際はバットの先端をインコースからアウトコースに押し出すようにスイングすべきであると記されている（ウィリアムズとアンダーウッド 2000, 古田 2010）。これらのことから、打者が狙った方向に打球を放つためには、スイング開始のタイミングに加えて、バットスイングの軌道も変化させることが必要であると考えられる。

前節では、インパクト時のバットのヘッドスピードと方位変化に対して、打者の両手が加えた力系の効果を明らかにした。この結果を応用すると、左右方向へ打球を放つための方策を推察することができる。例えば、右打者が流し打ちを可能にするためには、打撃面をライト側に向けてボール・インパクトを迎える必要があり、そのためにはセンター方向へ打撃するよりもバットの水平角に対する両手トルクの正の貢献を減少させ、かつ左右各手部がライト方向または投手方向に力を加えるようにスイングを行うことが重要であると予想される。しかしながら、これまで行われてきた研究は、打ち分けにおける身体運動のキネマティクス（田子 2006）やボールとバットのインパクトメカニズム（城所ら 2013）において打球方向による違いが分析されているが、バットの運動がどのようにしてコント

ロールされているかは検討されていない。左右方向への打ち分けにおいて、打球方向毎にバットスイングが生み出されるメカニズムを明らかにすることは、打者の打撃パフォーマンスを向上させるために重要な知見となり得る。そこで本節では、引っ張りとし打ちのバットスイングがどのような力によって生み出されているかを明らかにし、左右に打ち分けるためのスイングメカニズムの違いについて検討を行った。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は東京六大学野球連盟に所属する選手 7 名と日本野球連盟に所属する社会人選手 19 名の計 26 名（身長： $1.77 \pm 0.04\text{m}$ ，体重： $80.3 \pm 5.1\text{kg}$ ，年齢： $24.1 \pm 3.7\text{yr}$ ）であり，このうち右打者が 15 名，左打者が 11 名であった。本節は，早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会の承認を得た上で実施した。被験者には事前に本研究の目的および実験内容について十分な説明を行い，書面によって実験参加に対する同意を得た。

2.2 データ収集

実験は 2 回に分けて行った。1 回目は大学生選手を対象としたデータ収集を室内練習場で実施し，2 回目は社会人選手を対象としたデータ収集を屋外の野球場で実施した。被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後，ピッチングマシンを用いたフリー打撃を行わせた。ピッチングマシンはホームベースから正規の距離（18.44m）離れた位置に設置し，一定のボール速度で打者のストライクゾーンの真ん中付近を狙って硬式野球ボールを投射した。実際に投射されたボールの球速は $30.9 \pm 0.7\text{m/s}$ であり，日間差は 0.3m/s であった。各被験者には硬式用木製バット（2TW-10658，ミズノ社製）を用いて，投げられたボールを自身が理想する打撃フォームで引っ張りとし打ちを行うように指示した。使用したバットの長さは 0.84m ，質量は 0.893kg ，重心位置はグリップエンドから 0.57m ，重心まわりの慣性モーメントは短軸まわりが $4.11 \times 10^{-2}\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，長軸まわりが $2.97 \times 10^{-4}\text{kg} \cdot$

m²であった。バットの慣性特性は前節と同様の方法で算出した。なお、長軸まわりの慣性モーメントは、円周の異なる 5cm 長の円筒を連結した単一密度の物体と仮定して算出した。グラウンド上にマーカを設置して打球が放たれるフェアゾーンを 3 等分（レフト、ライト、センターに分割）し、右打者の場合、レフト側への打撃を引っ張り、ライト側への打撃を流し打ちと定義した（図 3-2-1）。打球方向はボールが落下した地点を験者が目視することによって判定した。指定した方向に打球が放たれ、かつ被験者の自己評価が 3 段階で最も高い評価を行った 1 試技を成功試技とし、分析対象とした。実験は各被験者につき各方向に成功試技が収集できるまで継続した。成功試技が得られるまでに要した試行数は引っ張りが 8±5 回、流し打ちが 7±5 回であった。なお、本節では被験者にとって通常の打撃フォームで打球を打ち分けさせるために、ピッチングマシンの球速は維持したまま、左右方向（インコース・アウトコース）の投球コースを各被験者の要望に応じて調節した。

実験中のバットとボールの運動は、電氣的に同期された 2 台の高速度カメラ（Phantom Miro, Vision Research 社製）を用いて、撮影速度 1000fps, 露光時間 0.2~0.3ms, 解像度 640×480pixel で撮影した。また、バットの長軸まわりの角速度を記録するため、バットのグリップエンドに 3 軸ジャイロセンサ（ARS-K12, DTS 社製, サンプル周波数 1000Hz）を取り付けた。センサから得られるアナログデータは、被験者の腰背部に固定したデータログシステム（FA-DL-3000, S&ME 社製）に記録した。撮影範囲を 3 次元空間として構築するために、実験開始前に 68 個のコントロールポイントで構成される放射状の較正器をホームベース付近に設置して撮影を行った。較正器の既知座標とデジタルサイズによる推定値との標準誤差は、2 回の測定で平均 X_G=1.5mm, Y_G=1.6mm, Z_G=1.4mm であった。

2.2 データ処理

本節では、バットのスイング開始時からボールがバットに衝突する直前の 1 フレームまで（インパクト直前）を分析範囲に設定し、スイング局面として定義した。スイング開始

時はバットの先端（バットヘッド）とグリップエンドのスピードの和が 5m/s 以上になるフレームが 5 フレーム継続した時点のフレームとし、インパクト時は撮影した映像からバットにボールの接触を目視で確認し、その 1 フレーム前の時点とした。

ホームプレートの捕手側の頂点を原点とし、右打席から左打席に向かう方向を X_G 、原点から水平面上のピッチングマシンに向かう方向を Y_G 、鉛直上方向を Z_G とて基準座標系 ($R_G : X_G, Y_G, Z_G$) を定義した (図 3-2-1) 。 R_G から計測したバットとボールの 3 次元座標を得るために、動作解析ソフトウェア (Frame-DIAS V, DKH 社製) を用いてデジタイズを行った。デジタイズポイントはバットヘッドの中心、バットヘッドからグリップエンドに向かって 0.49m 離れた位置に巻きつけたテープの中心、ボール中心の 3 点とした。マニュアルデジタイズによるランダムノイズを低減するために、デジタイズは 1000Hz で撮影した映像の全フレームについては行わず 3 フレーム間隔 (250Hz) で行った。バットは高速でスイングされるため、バットヘッドが捕手側を向いた時点 (MID) からインパクト (BI) までの時間は約 0.04 秒である (第 2 章表 2-1) 。すなわち、打撃動作を 250Hz で撮影した場合、MID から BI までのバット座標は 10 フレームしか得られないことになる。本節ではインパクト直前のバットスイングの変化を詳細に分析するため、デジタイズによって得られた 2 次元座標データは 3 次スプライン関数により元の 1000Hz のデータになるように補間した。デジタイズから得られた座標は DLT 法を用いて 3 次元座標に変換した。データログシステムに記録したセンサのアナログデータは A/D 変換を行い、角速度データとしてコンピュータに取り込んだ。角速度データは映像と同期されていないため、インパクトによる振動によってデータの増減が不連続になったフレームをインパクト時とみなし、分析範囲のデータを抽出した。また、全被験者のデータが右打者のものとみなせるように、左打者のデータについては反転処理を行った。

バットの座標値と角速度データは Winter (1990) の方法によって遮断周波数 (バット座標 : 15.0~28.7Hz, 角速度 : 15.0~54.9Hz) を決定し、4 次のバターワース型ローパスデジタルフィルタによって平滑化した。なお、ボール・インパクトによるバットの急激なス

ピードの変化が平滑化に及ぼす影響を最小限に抑える為、インパクト直前 20 フレームの座標値にフィットする 3 次の近似多項式を用いてインパクト後の座標値 20 フレーム分を外挿した後に平滑化を行った (Giakas et al. 1998) . この外挿方法を用いた平滑化を用いた理由は、多項式でフィッティングする終端データの加速度の誤差が他の方法 (線形補間, 自己回帰モデル, 5 次スプライン) よりも小さくなることが示されているためである.

基準座標系 R_G に対するバットの方位 (水平角, 鉛直角) を算出するために, バットのグリップエンドからバットヘッドに向かう方向が X_A , Z_G と X_A とを外積した方向が Y_A , X_A と Y_A とを外積した方向が Z_A となる移動座標系 (分析用バット座標系 $R_A : X_A, Y_A, Z_A$) を定義した. さらに, 前節と同様にスイング座標系 ($R_S : X_S, Y_S, Z_S$) とバット座標系 ($R_B : X_B, Y_B, Z_B$) を定義した. R_S はグリップエンドに対するヘッドの速度によって変化する移動座標系であり, バットに作用する力-偶力系を表すために用いた. なお, 前節と同様に打者の両手がバットに加えた合力を「両手合力」, 偶力を「両手トルク」と定義した. 両手合力を R_S について表すと, X_S 成分がバットの長軸方向, Y_S 成分がヘッドの加速方向, Z_S 成分がスイングの回転軸方向への力を示す. 両手トルクは, X_S 成分がバット長軸まわりのローリング, Y_S 成分がスイング軌道の制御, Z_S 成分がスイングの角加速をもたらすモーメントを示す. また, R_B はバット長軸 X_B とともに Y_B, Z_B も回転する移動座標系であり, オイラーの運動方程式を用いてバットの回転運動を表すために用いた. ただし, R_G に対する R_B の方位を表す回転行列を算出するためには, R_B のバット長軸 X_B に直交する Y_B と Z_B の方向が必要となる. しかし, 撮影した画像から Y_B と Z_B の方向を算出することは困難であると判断し, ジャイロセンサから得られたバット長軸まわりの角速度データを用いて算出することとした. 具体的には, バット長軸まわりの角速度を, 初期値を 0 と仮定し, スイング開始からインパクト時までを時間積分することにより, スイング局面におけるバット長軸まわりの角変位 (ローリング角) を経時データとして求めた. そして, R_A が R_G と方位が一致する座標系 $R_{A0} (X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})$ の Z_{A0} 軸まわりに θ だけ回転させ, 次にこの回転で得られた座標系 $R_{A1} (X_{A1}, Y_{A1}, Z_{A1})$ の Y_{A1} 軸まわりに ϕ だけ回転させ,

さらにこの回転で得られた座標系 R_{A2} (X_{A2} , Y_{A2} , Z_{A2}) の X_{A2} 軸まわりに ψ だけ回転させることにより, R_A の方位を表す R_{A3} (X_{A3} , Y_{A3} , Z_{A3}) を求めた. 上記の 3 つの回転角度 (θ , ϕ , ψ) はそれぞれ, バットの水平角, 鉛直角, ローリング角を表す. R_{A0} に対する R_{A3} の方向を表す回転行列 $A_{R_{A3}/R_{A0}}$ は, R_{A0} に対する R_{A1} の方向を表す回転行列, R_{A1} に対する R_{A2} , R_{A2} に対する R_{A3} を表す回転行列の積によって, 以下のように表すことができる.

$$A_{R_{A3}/R_{A0}} = A_{R_{A1}/R_{A0}} \cdot A_{R_{A2}/R_{A1}} \cdot A_{R_{A3}/R_{A2}}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & -\sin\theta\cos\psi + \cos\theta\sin\phi\sin\psi & \sin\theta\sin\psi + \cos\theta\sin\phi\cos\psi \\ \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi & -\cos\theta\sin\psi + \sin\theta\sin\phi\cos\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi \end{bmatrix}$$

上記の回転行列に R_G に対する R_A の方位を表すバットの水平角 θ と鉛直角 ϕ , ジャイロセンサから得られたローリング角 ψ をフレームごとに代入することにより, R_G に対する R_B の方位を表す回転行列 $A_{R_{B3}/R_{B0}}$ を算出した. したがって, $A_{R_{B3}/R_{B0}}$ の縦列成分はそれぞれ, バット座標系 R_B (X_B , Y_B , Z_B) の各軸方向のベクトルを表す.

2.3 分析項目

前節と同様の方法を用いて, バットに作用する力-偶力系を算出し, スイング座標系 R_s について表した. また, スイング局面において R_s について表した力-偶力系の各成分が生み出すヘッドスピードを全成分が生み出したヘッドスピードで除すことにより, インパクト時のヘッドスピードに対する各成分の貢献度 (%) を算出した. 力-偶力系の回転効果の各成分が生み出すバット角度 (バット水平角, バット鉛直角) を回転効果の全成分が生み出したバット角度で除すことにより, インパクト時のバット角度に対する各成分の貢献度 (%) を算出した. なお, 本節では, ヘッドスピードは 9 成分 (スイング開始時の速度, 両手合力の X_s , Y_s , Z_s 成分, 重力, 初角速度の大きさ, 両手トルクの大きさ, 両手合力のモーメントの大きさ, ジャイロ効果の大きさ), バット角度は 4 成分 (スイング開始時の角速度の大きさ, 両手トルクの大きさ, 両手合力のモーメントの大きさ, ジャイロ効果

の大きさ)によって構成されている。

投球のスピードは、インパクト直前 5 フレームにおけるボール変位を経過時間で除すことによって算出した。投球の水平角は、インパクト直前 10 フレームにおけるボールの X_G , Y_G 座標から回帰直線の傾きを求め、その傾きと Y_G とのなす角度として算出した。同様に投球の鉛直角は、鉛直面に投影したインパクト直前 10 フレームのボール座標から回帰直線の傾きを求め、その傾きと水平面とのなす角度として算出した。また、打球のスピードはインパクト直後 5 フレームにおけるボール変位を経過時間で除すことによって算出した。打球の水平角と鉛直角は、投球の角度と同様に、 X_G - Y_G 平面と鉛直面に投影したボール座標から回帰直線の傾きを求め、それぞれ Y_G と水平面とのなす角度として算出した。

インパクト時のヘッドスピードは、インパクト直前 3 フレームのバットヘッドの変位を経過時間で除すことによって算出し、スイング角はバットヘッドの速度ベクトルと水平面とのなす角度として算出した。なお、バットの運動は投球や打球に比べて 1 フレーム間のスピードの変化が大きいため、分析区間をボールの運動よりも短縮した。バットの水平面上の角度 (θ_H : バット水平角) はインパクト時のバット長軸を水平面上に投影し、 X 軸とのなす角度として算出し、鉛直面上の角度 (θ_V : バット鉛直角) はインパクト時のバット長軸を鉛直面上に投影し、水平面に対する角度として算出した (図 3-2-2)。ボールをインパクトした位置は、バットにボールが衝突した時点のボール座標を求めた。スイング時間は、スイング開始時からバットにボールが衝突した時点までのフレーム数をカウントすることによって算出した。

2.4 統計処理

算出項目の結果は全て平均値と標準偏差で表した。打球方向による違いを比較するため、各算出項目について対応ありの t 検定を行った。統計処理は危険率 5%未満を有意とした。なお、ヘッドスピードとバット角度は、それぞれ 9 つの成分と 4 つの成分によって決定されるため、各成分の貢献度についての打球方向による違いはボンフェローニ法によって補

正した有意水準 ($p < .05/9$, $p < .05/4$) を用いて t 検定を行った.

3. 結果

表 3-2 に引っ張りとし打ちにおけるボールとバットのキネマティックデータとインパクト位置を示した. 投球されたボールのスピードと水平方向の角度には, 引っ張りとし打ちで有意差はなかったが, 鉛直方向の角度に有意な差が認められ, 流し打ちの方が平均で 0.3° 傾斜の大きいボールであった. 打球のスピードは引っ張りの方が有意に大きかったが, 打球の鉛直方向の角度は同程度であった. インパクト時のヘッドスピードは打球方向によって有意差はみられなかったが, スイング角は引っ張りの方が有意に大きく, 引っ張りは平均で約 10° のアッパースイングでインパクトを迎えていた. スイング時間は, 引っ張りの方が流し打ちより 0.012 秒長く, 有意に異なることが示された. インパクト時におけるバット水平角は, 引っ張りは全ての試技が正の値 ($7.1 \sim 32.0^\circ$) でありバットの打撃面がレフト側を向いていたのに対して, 流し打ちは全ての試技が負の値 ($-28.3 \sim -0.8^\circ$) でありバットの打撃面がライト側に向いていた. このとき, バット鉛直角は両試技とも正の値であり, グリップエンドに対してバットヘッドが下方に位置しており, 流し打ちの方が引っ張りよりもバットヘッドの位置が有意に低かった. 両試技のインパクト位置は全ての方角で有意差がみられ, X 座標 (左右方向) をみると, 流し打ちは引っ張りよりも右側 (アウトコース) でインパクトしていた. また, Y 座標 (投手・捕手方向) は引っ張りの方が投手側でインパクトを迎えていた. Z 座標 (上下方向) も引っ張りの方が流し打ちよりも高い位置でボールをインパクトしていた.

バットに作用した力-偶力系をスイング座標系 R_s について表した各成分の経時変化を図 3-2-3 に示した. 両試技ともバット長軸方向の両手合力 (X_s 成分: $F_{x_s}^H$) は, -0.2 秒付近から負の方向に増加し, インパクト直前には約 -1000N に達していた. また, ヘッドの加速方向とスイングの回転軸方向の両手合力 (Y_s 成分: $F_{y_s}^H$, Z_s 成分: $F_{z_s}^H$) はそれぞれ, 100N 未満で負と正の値をインパクト直前まで維持していた. 両手トルクの Z_s 成分 (スイ

ングを角加速させる成分)は、流し打ちはスイング局面を通してほぼ正の値を維持していたが、引っ張りは-0.05秒以降から負の値を示した。両手トルクの Y_s 成分 (スイング軌道の制御成分) は、両試技ともスイング局面中期 (-0.15秒付近) から負の方向に増加し、インパクト付近において引っ張りは負の値を維持していたが、流し打ちは正の方向に増加した。両手合力のモーメントの Z_s 成分 (スイングを角加速させる成分) は、スイング局面中期から正の方向に増加し始め、インパクト付近において引っ張りは正の値を維持していたが、流し打ちは負の方向に増加した。また、両試技における両手合力のモーメントの Y_s 成分 (スイング軌道の制御成分) は、スイング局面中期まで負の値を維持していたが、-0.1秒以降は正の値に転じた。ジャイロ効果の Y_s 成分 (スイング軌道の制御成分) は、両試技とも-0.1秒からインパクトまで正の方向に増加していた。各回転効果の Z_s 成分 (ローリング成分) と、ジャイロ効果の X_s 成分 (角加速成分) は、スイング局面を通してほぼ $0N\cdot m$ であった。

ヘッドスピードに対する力・偶力系の各成分の貢献度は、両試技ともに両手合力の X_s 成分 (Fx_s^H) が最も大きく (引っ張り : $72.8\pm 3.6\%$, 流し打ち : $73.3\pm 3.2\%$) , 次に両手トルクが大きい (引っ張り : $35.3\pm 8.8\%$, 流し打ち : $41.0\pm 7.3\%$) ことが示された (図 3-2-4) 。他の成分は 5%未満の貢献度であった。両手合力が生み出したヘッドスピードの経時変化をみると、両試技とも Fx_s^H に起因するヘッドスピードは-0.15秒付近からインパクトまで正の方向に増加していたが、他の並進効果に起因するヘッドスピードの増減はほとんどみられなかった (図 3-2-5a) 。両手トルクと両手合力のモーメントが生み出したヘッドスピードの経時変化をみると、両試技とも両手トルクに起因するヘッドスピードがスイング開始直後から正の方向に増加し、引っ張りはインパクト直前で僅かに減少するのに対して、流し打ちはインパクトまで増加し続けた (図 3-2-5b) 。両手合力のモーメントに起因するヘッドスピードは、スイング開始直後から負の方向に増加し、引っ張りは-0.05秒付近から僅かに正の方向に増加したのに対して、流し打ちはその時刻の負の値を維持したままインパクトを迎えていた。他の回転効果に起因するヘッドスピードはスイング局面を

通して、ほぼ 0m/s を維持していた。一方、両試技のヘッドスピードを生み出す 9 成分の貢献度を比較した結果は、重力（引っ張り： $-1.4 \pm 0.5\%$ ，流し打ち： $-0.7 \pm 0.6\%$ ），両手トルクの大きさおよび、両手合力のモーメントの大きさ（引っ張り： $-4.2 \pm 8.9\%$ ，流し打ち： $-10.3 \pm 8.2\%$ ）に有意な差が認められた（ $p < .05/9$ ）。

バット水平角に対する力-偶力系の各成分の貢献度は、両試技ともに両手トルクが約 200%の正の貢献を示し、両手合力のモーメントが約 100%の負の貢献を示した（図 3-2-6a）。両試技のバット水平角を生み出す 4 成分の貢献度を比較した結果、両手トルクの大きさ（引っ張り： $188.7 \pm 39.5\%$ ，流し打ち： $212.2 \pm 37.0\%$ ）と両手合力のモーメントの大きさ（引っ張り： $-97.8 \pm 33.8\%$ ，流し打ち： $-115.6 \pm 33.5\%$ ）に有意な差が認められた（ $p < .05/4$ ）。各成分が生み出したバット水平角は、両試技とも両手トルクに起因する角変位はインパクトまで正の方向に増加し、両手合力のモーメントに起因する角変位はインパクトまで負の方向に増加した（図 3-2-7a）。また、スイング開始時の角速度とジャイロ効果に起因する角変位は、両試技ともスイング局面を通してほとんど増減していなかった。

バット鉛直角については、両試技とも両手合力のモーメントの貢献が最も大きかった（引っ張り： $152 \pm 175\%$ ，流し打ち： $92 \pm 171\%$ ）。バット鉛直角を生み出す両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度は、バット水平角に比べて被験者間のばらつきが大きかった（図 3-2-6b）。両試技の貢献度を比較したところ、両手合力のモーメントの貢献が引っ張りの方が有意に大きいことが示された（ $p < .05/4$ ）。各成分が生み出したバット鉛直角は、両試技ともにスイング開始時の角速度と両手合力のモーメントに起因する角変位が、-0.15 秒以降からインパクトまで正の方向に増加した（図 3-2-7b）。両手トルクに起因する角変位は、-0.2 秒付近から負の方向に増加したが、-0.05 秒を過ぎてから僅かに正の方向に増加した。また、ジャイロ効果に起因する角変位も両手トルクに起因する角変位と同様に、スイング局面中期（-0.15 秒付近）から一旦負の方向に増加した後に、インパクト直前 0.05 秒付近から正の方向に増加した。

4. 考察

本節の目的は、打者がどのようにして左右方向に打球を打ち分けているかを明らかにするために、インパクト時のヘッドスピードとバット角度に対して、打者の両手がバットに加えた力-偶力系の各成分が生み出す貢献度を引っ張りとし打ちと比較することであった。その結果、両試技ともにバットを長軸方向（ヘッドからグリップエンドの方向）に引く力が、インパクト時におけるバットのヘッドスピードの約 70%を生み出しており、残りの約 30%は両手トルクによって生み出されていることが示された。また、バット角度については、水平角は両手トルク、鉛直角は両手合力のモーメントが主な原動力となって生み出されていた。しかし、引っ張りのヘッドスピードとバット水平角を生み出す各成分の貢献度は、流し打ちと比較して両手トルクによる正の貢献と両手合力のモーメントによる負の貢献が小さく、バット鉛直角を生み出す各成分の貢献度については、流し打ちと比較して両手トルクによる正の貢献が大きかった。このことから、熟練した打者は両手トルクと両手合力のモーメントの大きさを変化させることにより、バットの打撃面の方向を調整し、左右へ打ち分けていることが示された。

4.1 投球のコンディションと打撃環境の違い

両試技の投球コンディションを比較すると、スピードと水平角は同程度であったが、鉛直角には有意差がみられ、流し打ちの方が引っ張りよりも傾斜の大きい投球であった（表 3-2）。インパクト位置をみると、流し打ちは引っ張りよりも平均で 0.07m 低い位置でインパクトを迎えていた。このことから、両試技において投球の鉛直角が異なったのは、流し打ちの方が投射されたボールの到達点が低かったことに起因するものと考えられる。両試技におけるボール到達点の高さの違いは、硬式野球ボールの直径（約 0.07m）に相当する。すなわち、本節で分析対象とした流し打ちは、引っ張りよりもボール 1 個分低い位置でインパクトしていたことを示しており、両試技の打撃環境は統一されていなかったと言える。分析対象とした全試技のバット鉛直角とインパクト位置の高さとの関係を試みる。

と有意な負の相関関係が認められ ($r = -.82, p < .05$) , バット鉛直角が大きいほどインパクト位置が低くなることが示された. この結果から, 両試技におけるインパクト時のバット鉛直角に対する力-偶力系の各成分の貢献度の違い (図 3-2-4) には, 試技間の影響だけではなく, ボール 1 個分の高さの影響も含まれることに注意する必要があると言える. しかしながら, 分析対象とした試技は全て被験者の自己評価の高いものであったことを踏まえると, 引っ張り方向に打つときよりも低めのボールを狙うことが流し打ち方向に鋭い打球を放つための特徴であると推察される.

前後方向 (Y 方向) と左右方向 (X 方向) のインパクト位置は, 流し打ちは引っ張りよりも 0.05m アウトコース側, 0.34m 捕手側でインパクトを迎えていた (表 3-2) . 打撃の指導書には, 打球を打ち分けるには投球コースに応じてインパクト位置を変えることが望ましく, インコースのボールは投手寄り, アウトコースのボールは捕手寄りでインパクトして打ち分けることがセオリーであると記されている (古田 2010) . 本節においてインパクト位置の X, Y 座標が両試技で異なったのは, 指導書で推奨されているスイングが実際の打撃において実践されていたことを示すものであり, 確実に打ち分けを行う際に必要な違いであったと推察される. これらのことから, 両試技の打撃環境はボールのスピードと水平角以外は全て異なっており, 全ての打者が共通して打撃ポイントを変化させて打ち分けを行っていたと考えられる.

4.2 引っ張りと流し打ちにおけるバットの加速メカニズムの特徴

力-偶力系の各成分においてインパクト時のヘッドスピードに最も大きく貢献したのは, 両試技ともにバット長軸方向の両手合力 Fx_S^H であり, ヘッドスピードの約 70% を占めていた (図 3-2-4) . Fx_S^H に次いで大きな貢献度を示したのは両手トルクであり, ヘッドスピードの約 30% を占めていた. この結果から, 両試技ともバット長軸に対してグリップエンド方向に加える力がヘッドスピードを生み出している主な成分であることが明らかとなった. しかしながら, 両試技において重力, 両手トルク, 両手合力のモーメントの貢献度に有意

な差が認められた。重力はバットの重心速度が下方へ向かうとき、ヘッドスピードに対して正の貢献をする。両試技ともインパクト時において重力が負の貢献度を示したことは、スイング局面を通してバット重心が下方へ向かっていた時間よりも上方へ向かっていた時間の方が長かったことを表す。よって、流し打ちは引っ張りよりもスイング角が小さかった（表 3-2）ことから、引っ張りよりも重力による負の貢献が小さくなったと考えられる。

両試技のバットを加速させるメカニズム（両手トルクと両手合力のモーメント）の違いについて、ヘッドスピードへの貢献度の絶対値が大きかった 3 つの成分（ Fx_5^H 、両手トルク、両手合力のモーメント）が生み出したヘッドスピードの平均変化パターン（図 3-2-5）から考察する。 Fx_5^H が生み出すヘッドスピードは、両試技ともにスイングの中盤（-0.15 秒以降）から増加し始め、インパクトまで上昇し続けた。これに対して、両手トルクが生み出すヘッドスピードはスイング開始直後から増加し始めたが、-0.05 秒以降は、両試技で異なる変化を示した。両手合力のモーメントが生み出すヘッドスピードの変化は両手トルクとは正反対であり、スイング開始直後から減少し始め、-0.05 秒付近から試技間で異なる変化がみられた。この違いは、バットに対する両手合力が作用する向きが関係していると考えられる。つまり、この局面（-0.05～0 秒）において両手合力によるヘッドスピードが増加する引っ張りは、バットの回転が促進（右打者を頭上からみた際に、反時計まわりに回転）されるように両手合力が投手方向に作用していたことになり、流し打ちは同局面においてヘッドスピードの増減がみられなかったことから、両手合力はバット長軸と平行（ライト方向）に作用していたことを意味する（図 3-2-8）一方、同じ局面における両試技の両手トルクは、引っ張りはヘッドスピードがほぼ一定であったが、流し打ちは僅かに増加していた。このことから、インパクト直前の両手トルクは、引っ張りでは作用しておらず、流し打ちではバットの回転を促進させていたと考えられる。以上のことから、引っ張りと流し打ちは、両試技ともバットを長軸方向に引く力がヘッドスピードの大部分を生み出していたが、インパクト直前 0.05 前からバットに作用する両手合力の向きが異なることによって、両手トルクと両手合力のモーメントが生み出すヘッドスピードの割合に違い

がみられることが示された。

4.3 打ち分けを可能にするバット角度の制御

スイング開始時からボール・インパクトまでの間にバット水平角を大きく変化させる原動力となった主な成分は、両試技とも両手トルクであり約 200%の正の貢献をもたらしていたが、両手合力のモーメントは打撃方向とは逆方向にバットを回転させる働きを有していた(図 3-2-6a)。両手トルクが 100%以上の正の貢献をもたらしたのは、センター返しを行った前節で考察したように、両試技とも通常の打撃ポイントまでバットを回転させるために、両手合力のモーメントによる負の貢献を上回る必要があったためであると推察される。しかし、両試技の両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度には有意差が認められ、流し打ちの方が両手トルクによる正の貢献が大きく、両手合力のモーメントによる負の貢献が大きかった。この違いは、バット長軸に対する両手合力の方向が両試技で異なっていたことが要因の 1 つとして挙げられる。バット長軸と両手合力とのなす角度を算出してみると、引っ張りは-0.05 秒(バットヘッドが捕手方向を向く付近)からインパクトまでに負の値を示している時間が流し打ちよりも長いことが分かる(図 3-2-9)。このことは、引っ張りの方が両手合力のモーメントがバットを打撃方向に回転させる効果が大きいことを意味する。同時刻の流し打ちにおけるバット長軸と両手合力とのなす角度は 0°付近を維持しているため、両手合力のモーメントによるバットを打撃方向へ回転させる効果は極めて小さいものと推察される。また、両試技のスイング局面におけるバット水平角の変化量は、引っ張りが $251 \pm 20^\circ$ 、流し打ちが $223 \pm 20^\circ$ であり、平均で約 30°の違いがみられた。以上のことから、バット水平角に対して引っ張りの方が両手合力のモーメントによる負の貢献が小さかったのは、引っ張りは流し打ちよりも水平面上でのバットの回転を約 30°増加させる必要があったために、インパクト直前 0.05 秒付近から両手合力のモーメントによってバットを打撃方向に回転させていたためであると考えられる。引っ張りの両手合力のモーメントによる負の貢献が小さくなることは、打撃方向へのバットの回転を抑制

する効果を減少させる。すなわち、引っ張りの方が流し打ちよりも両手トルクによる正の貢献が小さかったのは、両手合力のモーメントによる打撃方向へのバットの回転を抑制する効果が減少したことで、両手トルクが生み出さなければならないバット水平角が減少したためであると推察される。

両試技の下方へのバットの方位変化（バット鉛直角）は、主に両手合力のモーメントによって生み出されており、引っ張りは流し打ちよりもその成分による貢献度が大きかった（図 3-2-6b）。両手合力のモーメントによるバット鉛直角の増加は、スイング中のバット長軸と基準座標系の Z_B 軸からなる平面（ X_B - Z_G 平面）上のバット長軸と両手合力のなす角度が、負の値を維持していることに起因すると考えられる（図 3-2-9）。引っ張りの方が両手合力のモーメントによる貢献度が大きかったことは、流し打ちよりも投手寄りでインパクトしていたことに起因してスイング時間が長くなった（表 3-2）ことにより、両手合力のモーメントがバットヘッドを下方に回転させる角力積が増加したためであると考えられる。それにも関わらず、引っ張りの方が流し打ちよりもインパクト時のバット鉛直角が約 6° 小さかった（表 3-2）のは、バット鉛直角に対する両手トルクとジャイロ効果による負の貢献度（下方への回転を抑制する回転効果）が引っ張りの方が僅かに大きい傾向にあった（図 3-2-6b）ためと推察される。また、引っ張りは流し打ちに比べて打撃ポイントが高かった（表 3-2）ことから、引っ張りを行う際に打者はバットヘッドを上方へ移動させようとスイングした結果、 X_B - Z_G 平面上のバット長軸と両手合力のなす角度がスイング局面を通して負の値となり、両手合力がバットヘッドを下方へ回転させるように作用したためと推察される。したがって、流し打ちに比べてインパクト位置が前方向（投手寄り）かつ上方向（高め）になる引っ張りでは、両手合力のモーメントによってバットヘッドが下方へ回転しやすくなるが、両手トルクとジャイロ効果によりバットヘッドが下がり過ぎないようにブレーキの効果を大きくしていることが示唆された。

前節では、バット鉛直角に対する両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度において被験者間差（標準偏差）が大きく、バット鉛直角を生み出すメカニズムが多様に存在する

ことを示した。標準偏差が大きい要因については、スイング中のバット長軸に対して両手合力の作用する向きが被験者間で共通していないことが関係していた。左右方向への打ち分けを行った本節でも、バット鉛直角に対する両手トルクと両手合力のモーメントの貢献度の標準偏差はバット水平角に比べて±100%以上大きく、両手トルクは引っ張りが±243°、流し打ちが±205%、両手合力のモーメントは引っ張りが±175°、流し打ちが±171%であった（図 3-2-6b）。この結果は、打球方向に関係なく、バット鉛直角を生み出す打撃技術が多様に存在することを示すものである。しかしながら、両手合力のモーメントによる貢献度は、流し打ちより引っ張りの方が有意に大きかったことから、引っ張りの方が両手合力のモーメントによってバットヘッドが下降しやすいスイングであることが示された。

5. まとめ

本節は、引っ張りと流し打ちにおけるインパクト時のヘッドスピードとバット角度に対して、打者の両手がバットに加えた力系の各成分が生み出す貢献度を比較した。その結果、スイング中のバット長軸に対する両手合力の向きが打球方向によって異なることに起因して、引っ張りは流し打ちよりもヘッドスピードと水平面上のバットの方位変化（バット水平角）に対する両手トルクの角力積による正の貢献と両手合力のモーメントの角力積による負の貢献が小さいことが示された。また、バットヘッドの下向き傾斜（バット鉛直角）は、打撃方向に関係なく両手合力のモーメントの角力積による正の貢献によって生み出されていたが、その割合は引っ張りの方が大きいことが示された。

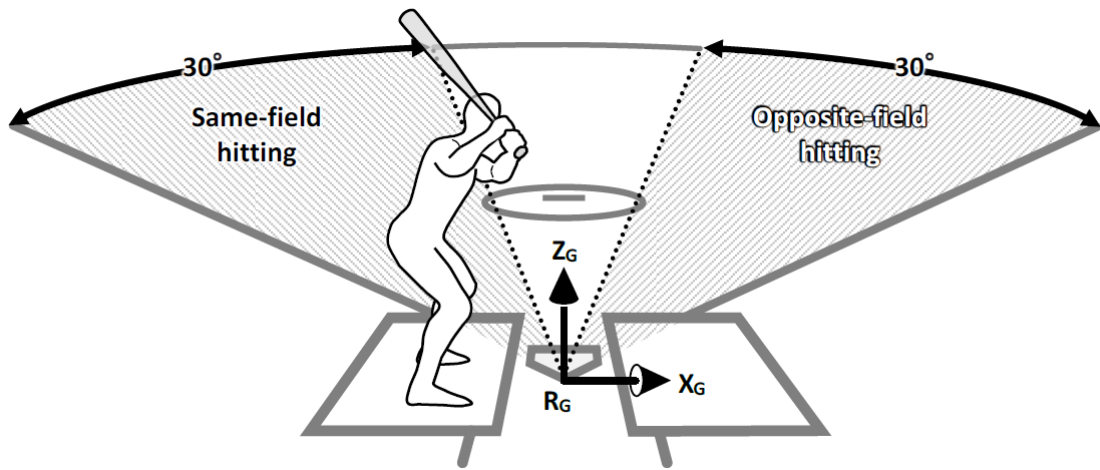


図 3-2-1 基準座標系と打ち分けの定義.

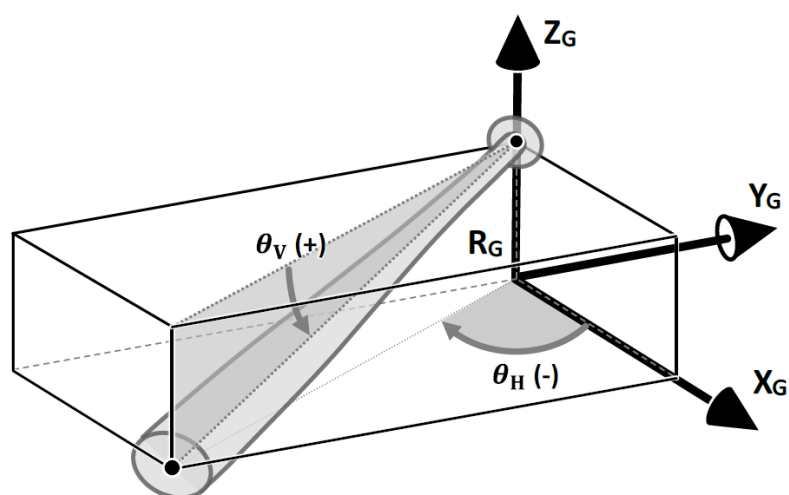


図 3-2-2 バット角度の定義.

表 3-2 ボールとバットのキネマティックデータ.

	Same-field hitting			Opposite-field hitting			t-test	
	Mean ± SD	Min.	Max.	Mean ± SD	Min.	Max.		
Pitched ball	Speed [m/s]	30.7 ± 1.0	28.1	32.1	30.9 ± 0.7	29.4	32.4	ns
	Horizontal angle [°]	-0.2 ± 1.3	-2.2	1.8	-0.3 ± 1.3	-2.0	1.7	ns
	Vertical angle [°]	4.2 ± 0.6	2.9	5.7	4.5 ± 0.5	3.1	5.4	*
Batted ball	Speed [m/s]	40.7 ± 2.4	34.8	46.2	39.6 ± 1.8	35.7	42.0	*
	Horizontal angle [°]	-22.7 ± 7.9	-38.6	-9.8	22.3 ± 8.5	7.5	41.0	***
	Vertical angle [°]	17.6 ± 10.0	-8.0	40.4	15.8 ± 7.5	-2.4	30.1	ns
Swing	Bat-head speed [m/s]	35.9 ± 2.1	32.2	40.1	35.4 ± 1.3	32.3	37.9	ns
	Swing angle [°]	9.7 ± 3.8	3.0	16.9	1.9 ± 5.0	-7.8	9.7	***
	Swing time [s]	0.167 ± 0.016	0.145	0.215	0.156 ± 0.014	0.137	0.189	***
Impact	Horizontal angle [°]	19.4 ± 7.0	7.1	32.0	-12.9 ± 7.6	-28.3	-0.8	***
	Vertical angle [°]	21.0 ± 5.0	12.2	31.9	26.9 ± 6.3	12.3	38.5	***
	X-coordinate [m]	0.10 ± 0.12	-0.21	0.30	0.15 ± 0.14	-0.26	0.38	*
Impact point	Y-coordinate [m]	0.63 ± 0.23	0.20	0.97	0.29 ± 0.20	-0.15	0.64	***
	Z-coordinate [m]	0.90 ± 0.11	0.70	1.12	0.83 ± 0.11	0.64	1.13	*

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

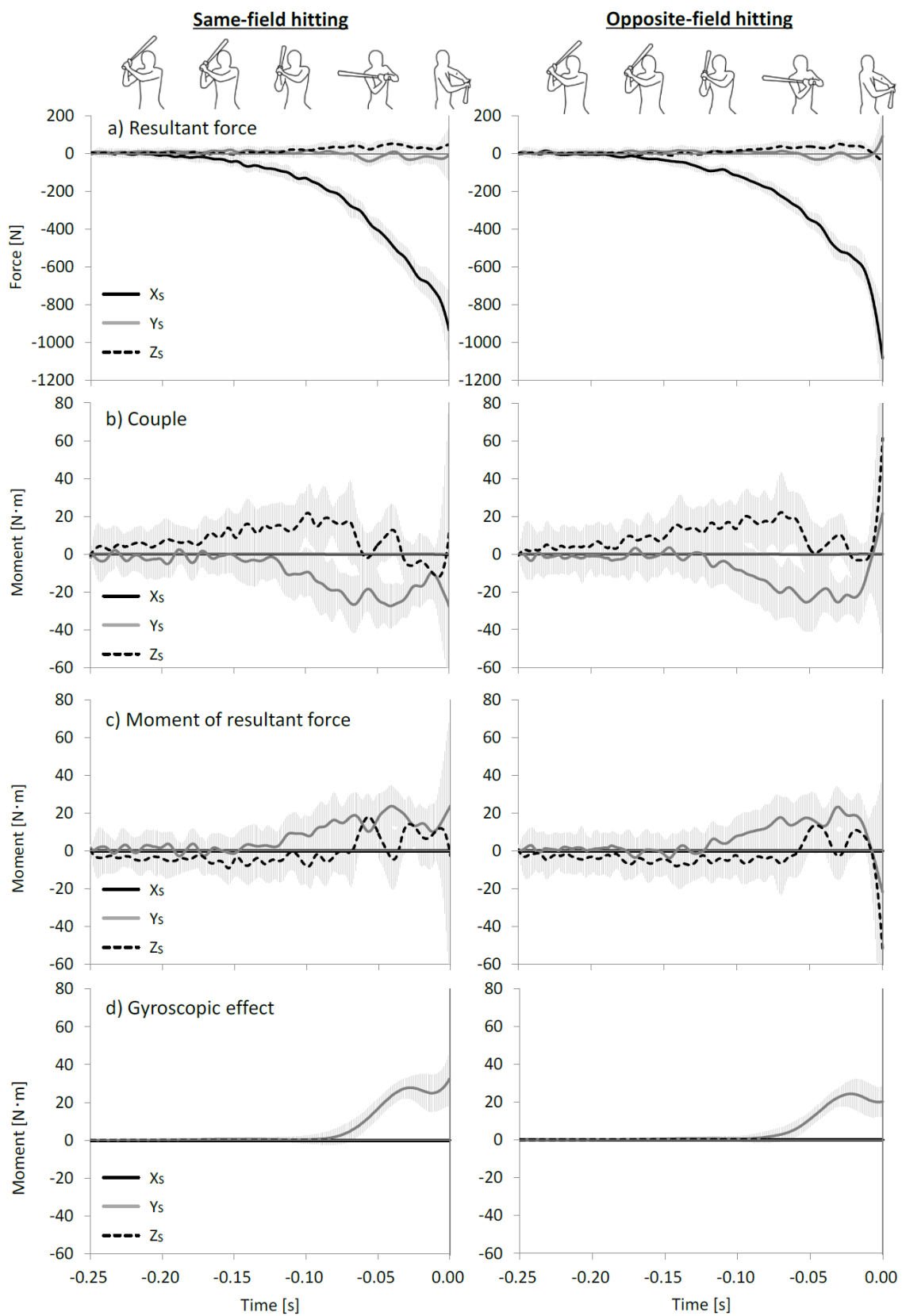


図 3-2-3 スイング座標系からみた力-偶力系の平均変化パターン。

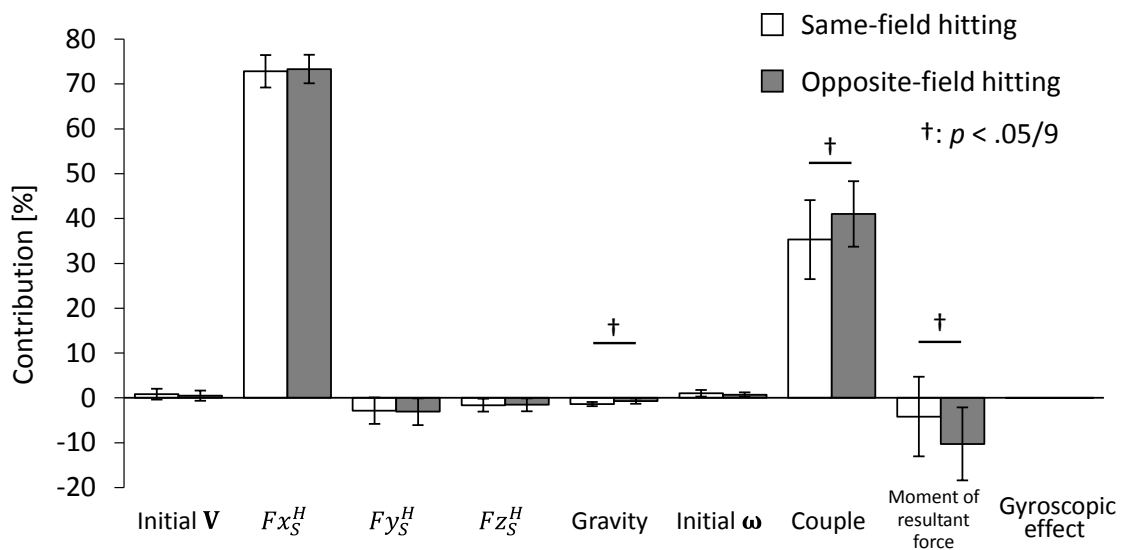


図 3-2-4 引っ張りとし打ちにおける力-偶力系の各成分が生み出したヘッドスピードへの貢献度の比較.

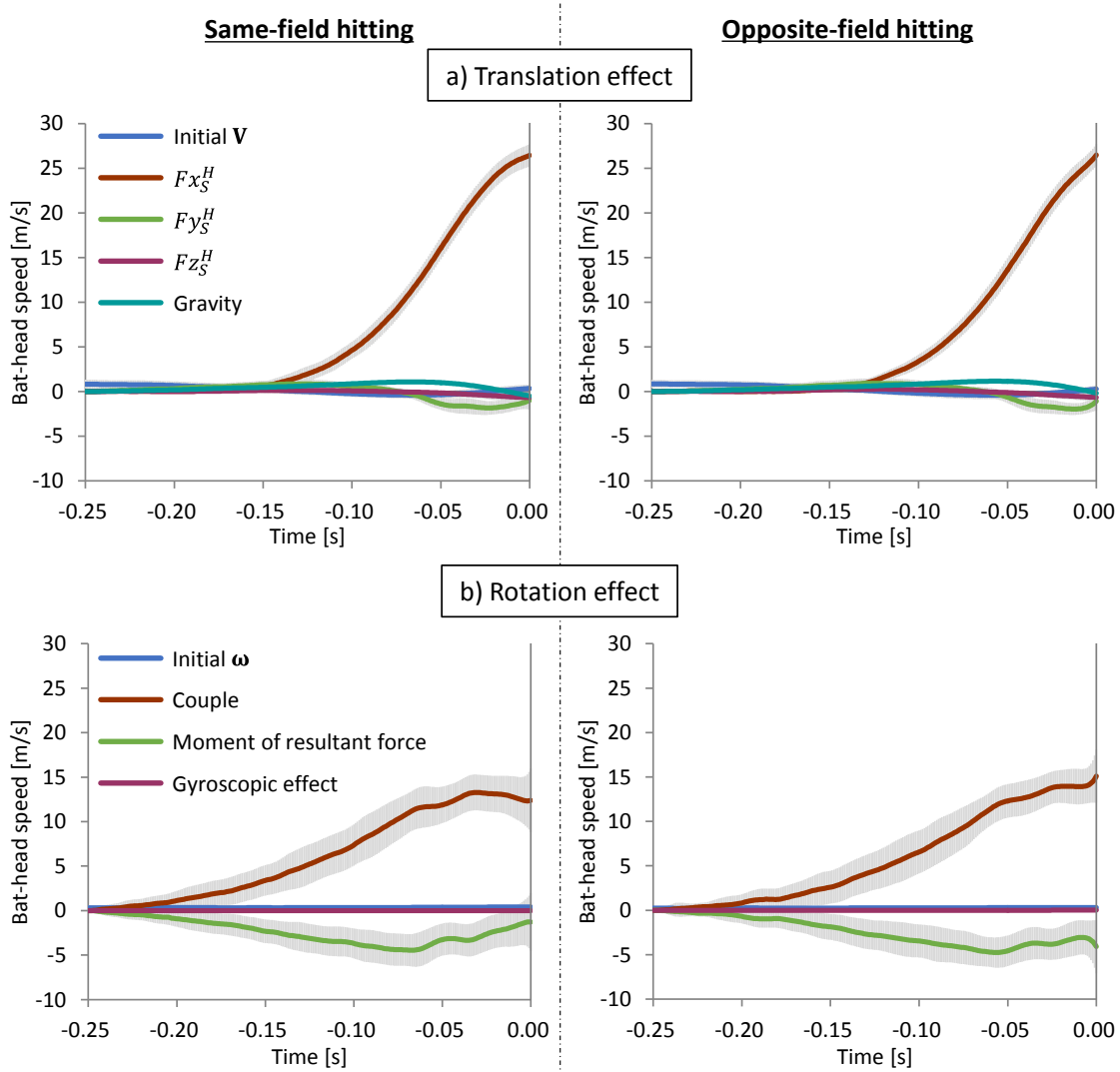


図 3-2-5 カ-偶力系の各成分が生み出したヘッドスピードの平均変化パターン。

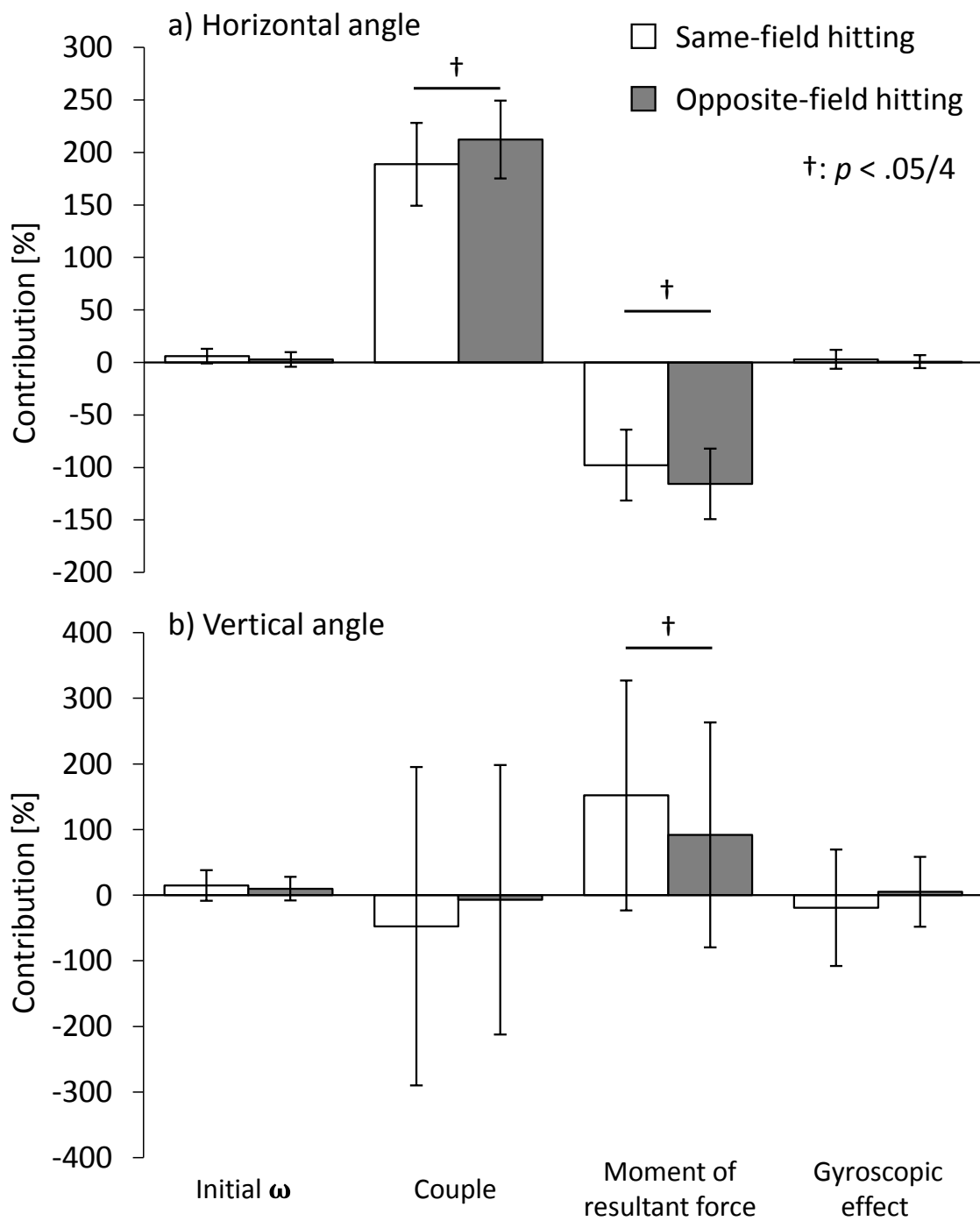


図 3-2-6 引っ張りとし打ちにおける力-偶力系の各成分が生み出したバット角度への貢献度の比較.

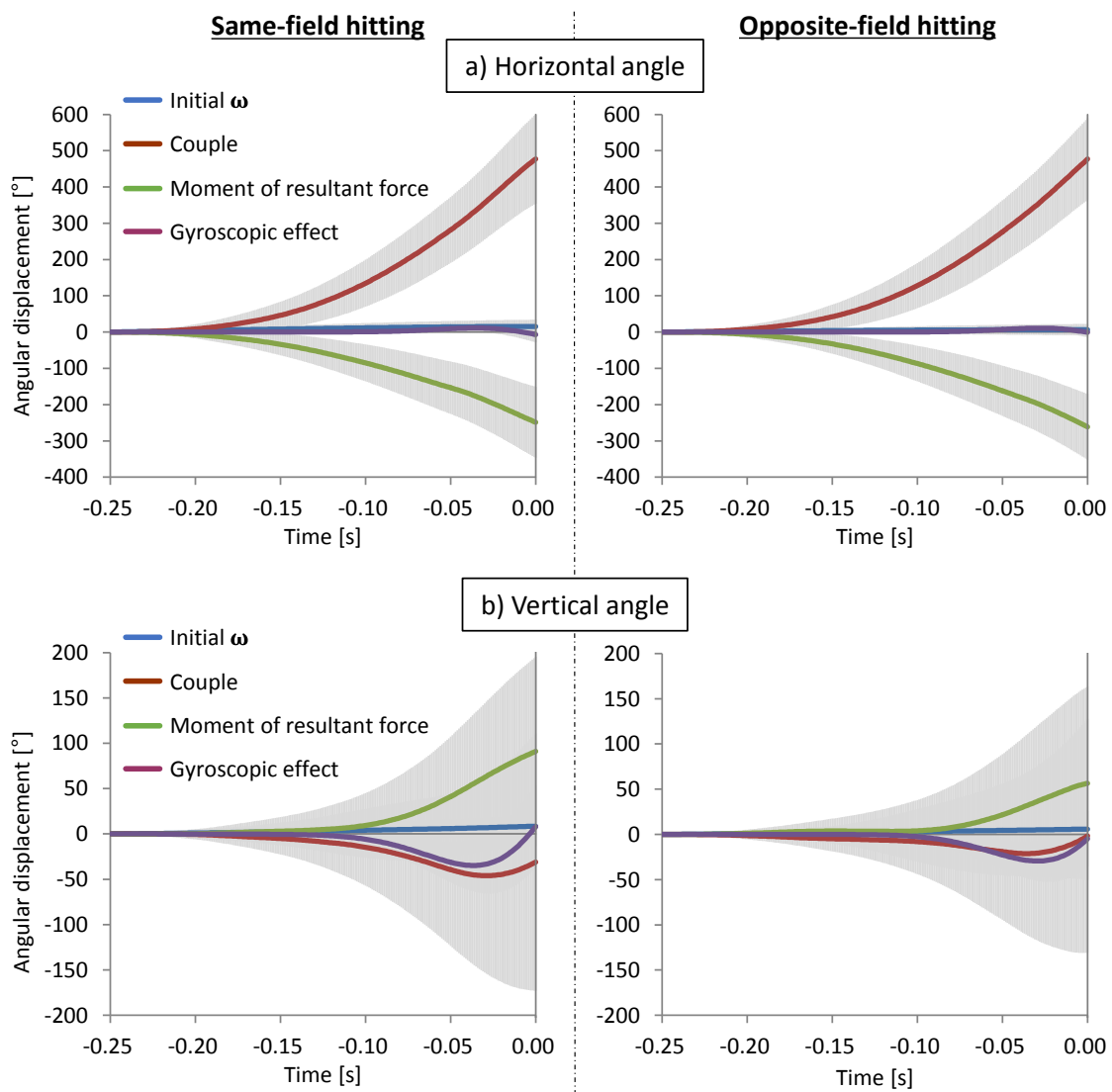


図 3-2-7 カ-偶力系の各成分が生み出したバット角度の平均変化パターン。

Overhead view

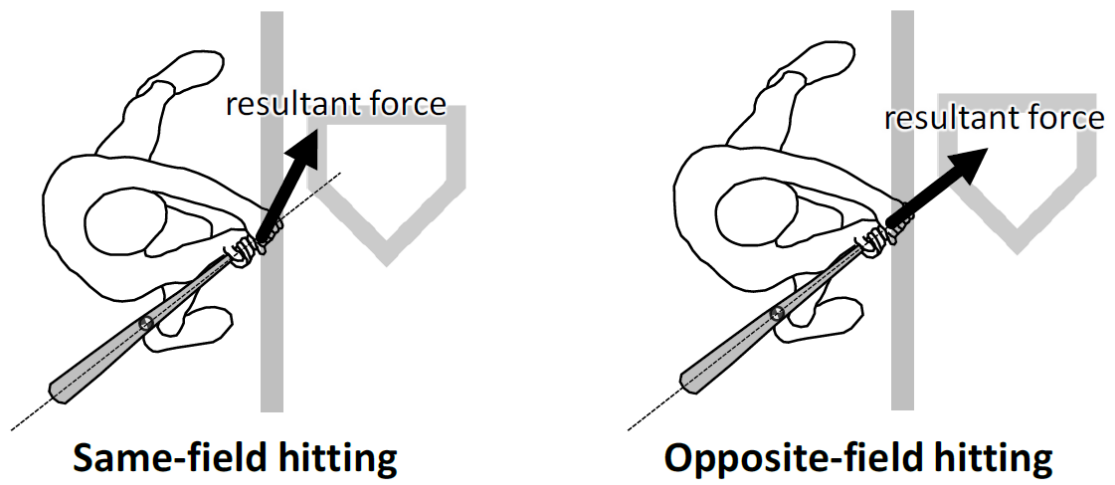


図 3-2-8 インパクト直前 0.05 秒付近の両手合力が作用している方向を示した概念図.

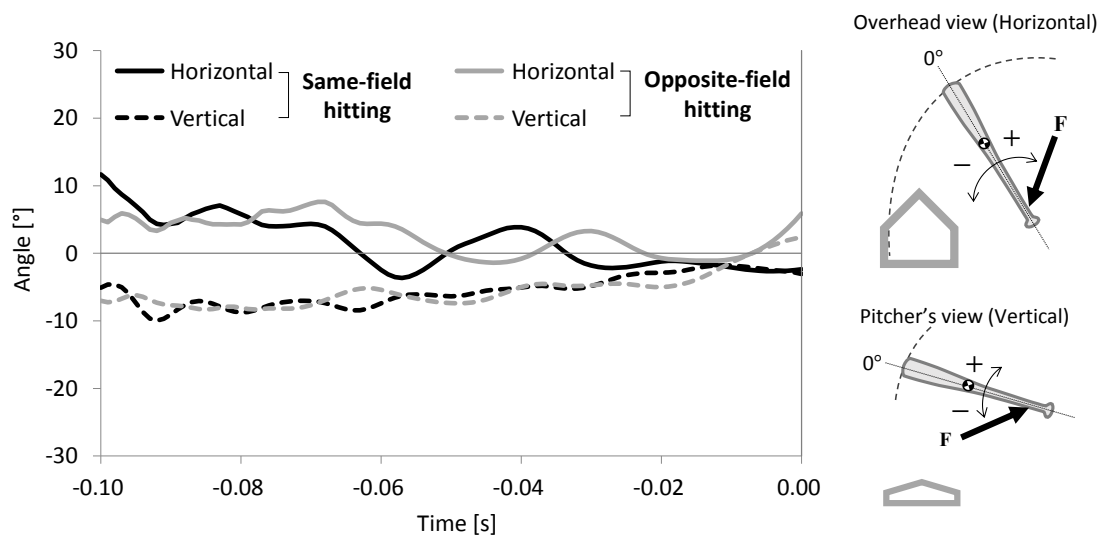


図 3-2-9 バットの長軸と両手合力のなす角度の平均変化パターン.

第4章 総括論議

本学位論文は、熟練した野球選手の打撃動作を対象に、バットのヘッドスピードと方位変化が生み出される力学的要因を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- I. センター返しを行う際のバットのヘッドスピードは、スイング局面（踏出し足のつま先接地時からボール・インパクトまでの局面：平均 0.234 秒）の前半では体幹の関節運動、後半では手関節の回転運動によって大部分が生み出される。また、インパクト直前のヘッドスピードは、手関節の回転運動が生み出したヘッドスピードが最も大きく、続いて下腕関節と骨盤の回転運動、上腕関節、骨盤の並進運動の順に大きい。

【第2章】

- II. センター返しを行う際にインパクト直前のヘッドスピードを増加させるには、スイング局面の始動期（踏出し足のつま先接地時から同足の踵接地時までの局面：平均でインパクトの 0.234～0.141 秒の間）において、肩関節の回転速度を抑制し、踵接地時からバットヘッドが捕手方向を向くまでの間に下腕関節の回転速度を増加させる（体幹を高速度で捻る）ことが重要である。【第2章】

- III. 打球方向に係わらず、インパクト時のヘッドスピードは、主に両手部がバット長軸のグリップエンド方向に加える力と両手トルクによる正の貢献によって生み出される。しかし、引っ張りを行う際は流し打ちを行う際よりも、両手トルクによる正の貢献および両手合力のモーメントによる負の貢献が小さい。【第3章1節, 2節】

- IV. 打球方向に係わらず、インパクト時におけるバット水平角（バットを水平面上に投影した角度）は、両手トルクによる正の貢献が両手合力のモーメントによる負の貢献を上回ることによって生み出される。しかし、引っ張りを行う際は流し打ちを行う際よ

りも，両手トルクによる正の貢献および両手合力のモーメントによる負の貢献が小さい。【第3章1節，2節】

- V. 打球方向に係わらず，インパクト時のバット鉛直角（バットヘッドの下向き傾斜角度）は，両手合力のモーメントによる正の貢献が両手トルクによる負の貢献を上回ることによって生み出される。しかし，引っ張りを行う際は流し打ちを行う際よりも，両手合力のモーメントによる正の貢献が大きい。【第3章1節，2節】

これらの知見から，野球打撃におけるバットのヘッドスピードに対する関節運動の貢献，および関節運動によってもたらされるバットの運動がどのような力によって生み出されているかが明らかとなった。

まず本章では，異なる分析方法を用いた各章の結果を総合してバットを加速させる打撃技術を議論するため，第2章と第3章における結果の解釈について整理する。第2章で算出した関節運動が生み出すヘッドスピードは，ある関節が回転した場合，当該関節よりも以遠の身体全体が同姿勢のまま移動・回転すると仮定した際に，その関節の角速度が仮想的に生み出したヘッドスピードの瞬間値を表す。また，この値はある瞬間のヘッドスピードがその瞬間の各関節運動（角速度）に起因するものとして算出された数値である。そのため，その瞬間に各関節に作用した力やモーメントの影響を表すものではなく，スイング開始からその瞬間に作用した力やモーメントの影響を直接的に表すものでもない。したがって，第2章におけるヘッドスピードに対して関節運動が及ぼした貢献という表現は，ある瞬間のヘッドスピードに対してそれを構成している各関節運動（角速度）に起因するスピードの割合の大きさを表すものとして置き換えることができる。一方，第3章で算出した貢献度は，打者の両手部がバットに加えた力やモーメントの累積効果によってもたらされたバットのヘッドスピードと方位変化の大きさの割合を表したものである。そのため，両手部がバットに加えた力系は，ヘッドスピードと方位変化を生み出す直接の要因となる。

第 2 章と第 3 章の結果を総合して議論する本章では、力学的意味を考慮し、関節運動によってもたらされたヘッドスピードは「生み出し得る」と記述し、力によってもたらされたヘッドスピードと方位変化は「生み出す」として記述することとした。

以上のことを踏まえ、本学位論文で得られた結果から打者がどのようにしてバットを加速させているのかについて考察する。スイング局面の前半に下胴関節（骨盤に対する胸郭）の回転速度を増加させることは、作用・反作用の関係から下半身が打撃方向とは反対に回転することになるため、両足に作用する地面反力のモーメントは打撃方向への回転を促進させる。これにより、スイング局面の後半において打者の身体とバットを合わせたシステムの角運動量を急増させることに繋がる。つまり、スイング局面の後半では、打者はバットを両手で把持（固定）しているため、上肢の各関節運動によってバットを回転させなくてもバットヘッドは曲線軌道で加速されることになる。バットヘッドを曲線的に移動させながらスピードを増加させるには、打者は曲線軌道で移動するバットヘッドに対して向心方向と接線方向の両方に加速度が生じるようにスイングしなければならない。第 2 章の結果から、スイング局面前半において骨盤と体幹の関節（下胴関節、上胴関節）の回転運動が生み出し得るヘッドスピードは全体の大部分を占めていたことから、この局面において打者は体幹に対するバットがスイング開始時の位置から変化せずに投手方向に回転していることになる（図 4-1）。したがって、インパクト直前 0.15 秒付近（踏出し足の踵が接地する付近、表 2-1）からヘッドスピードの上昇と同期してグリップエンド方向への力が増加したのは、バットの長軸が体幹の回転に伴って移動するバット重心の接線方向と向心方向を合成した方向と類似した方向に向き続けたためであると考えられる。両手部がバットのグリップエンド方向に加える力は、上肢の関節運動によってバットを長軸方向に引っ張ることで増加させることができる。しかし、第 2 章の結果において、肩関節の回転運動（肩甲帯に対する上肢）が生み出し得るヘッドスピードは、スイング開始からバットヘッドが捕手方向を向く付近まで僅かに増加し、最大で 2.5m/s まで達したが、インパクト直前には負の値（-3.2m/s）を示した（図 2-7）。また、剛体としてモデル化した両上肢の長

さは、スイング中に平均で 0.07m（最大長の約 10%）しか変化していなかった。先行研究では、ボトム側上肢の肩関節と肘関節はトップ側に比べて可動範囲が極めて小さいことが示されている（川村ら 2008）。これらのことから、打者はボトム側上肢の肩関節と肘関節の可動範囲を制限することで体幹と両手部との距離が変化しないようにスイングしていることが伺える。そのため、両手部がバットのグリップエンド方向へ加える力は、上肢の関節運動でバット長軸をグリップエンド方向に移動させることによって増加したものは微小であり、体幹と一体になって回転する両手部に対してバット重心が曲線軌道を維持するための向心力として機能するために増加したものと考えられる。したがって、上肢の関節運動は、両手トルクによってバットを加速・回転させつつ、徐々に加速するバット重心が曲線軌道上から逸脱しないようにバットをスイングさせる役割を担っていると推察される。

スイング局面の後半では、手関節の回転運動が生み出し得るヘッドスピードが最も大きかった（結果 I）が、このスピードは手関節まわりの関節トルクに起因するものではない。なぜなら、ヘッドスピードが手関節トルクによって生み出されていると仮定した場合、両手部がバットに加えたモーメントはヘッドスピードを増加させる方向に作用するはずであるが、小池（2004）のデータによるとスイング局面後半における左右各手がバットに加えたモーメントは、どちらの手部もヘッドスピードを減速させる方向に作用していることが示されている。また、第 3 章 1 節の結果においても、両手トルクが生み出すヘッドスピードはインパクト直前 0.05 秒付近から減少していた（図 3-1-5）。本論文で算出した両手トルクは手関節トルクを意味するため、この回転効果によるヘッドスピードが減少していたことは、インパクト直前において手関節トルクは打撃とは逆方向へ作用していたことを示しており、スイング局面後半に手関節トルクによってヘッドスピードが増加していないことは明らかである。第 3 章 1 節で考察したように、両手合力のモーメントはインパクト直前 0.1 秒付近まではヘッドスピードを減少させるが、それ以降はバットを加速させる働きをもつ（図 3-1-5b）。したがって、スイング局面後半において手関節の回転運動がヘッドスピードを生み出し得る主要因となったのは、インパクト直前 0.1 秒以降において両手合

力のモーメントによって打撃方向へのバットの回転と同期して、バットを把持している両手部が上肢セグメントに対して打撃方向へ回転したためであると考えられる。

第2章と第3章1節で得られた知見は静止したボールを打撃するティー打撃を対象として得られたものであり、これらが投げられたボールを打たなければならない打撃技術を反映しているかどうかは不明である。以下の総括論議では、ティー打撃から得られた知見が投げられたボールを打つという実戦に近い打撃パフォーマンスをどれだけ反映し得るのかを確認し、本学位論文の知見の適用範囲を整理した上で、打撃パフォーマンスを向上させるための指導やトレーニングへの応用について検討する。

1. 投球されたボールを打撃する動作への一般化

第2章と第3章第1節で用いたティー打撃は、現場において打者が自身のバットスイング軌道や様々な投球コースに対する打点を確認するために用いられる練習方法の1つである(功刀 1999)。この打撃方法は、試合における打撃と比較して動作自体は類似したものと考えられるが、ボールを打撃する位置やタイミングは任意で設定できるため、時間的・空間的な環境は投手やマシンから投じられるボールを打撃する試技とは大きく異なる。そこで、ティー打撃によって得られた知見が、試合のパフォーマンスにおいても適用可能なものかを確認するために、プロ野球選手 27 名に、ティー打撃とピッチングマシンから投じられるボールを打撃するフリー打撃を行わせ、両試技におけるバットのスイングパラメータを比較した。その結果、インパクト時におけるバットの水平面上での角度(バット水平角)以外のパラメータは全て有意な差が認められた(表 4)。この差を両試技のスイング軌道の典型例(図 4-2)をみて解釈すると、スイング開始時におけるグリップエンドに対するバットヘッドの位置が異なることに起因して、インパクトまでのバットヘッドの加速距離が変化し、インパクト直前のヘッドスピードおよびスイング時間に違いが生じたものと考えられる。ティー打撃がフリー打撃よりもバットが水平面と平行に近く、打者の後背部からスイングが開始された要因は、打撃における時間的・空間的な制約の有無が影響しており、ティー打撃はスイング開始のタイミングとインパクト位置が最適になるように打者自身がコントロールした結果であると考えられる。これらのことから、ティー打撃は試合で観察されるようなスイングと完全に一致するものでないということが理解できる。しかしながら、両試技のインパクト直前のヘッドスピード、スイング時間、水平角の変化量の差は、フリー打撃に対して平均が 10%未満に収まっていた。このことを考慮すると、ティー打撃のバットの運動は実戦に近いフリー打撃に比べてバット鉛直角に違いはあるものの、それ以外は類似性が高いと判断できるため、本論文で得られた知見は実際の試合における打者のパフォーマンスを概ね反映しているものと考えられる。ただし、ティー打撃は時間的・空間的な制約を排除したクローズドスキルであることから、得られた知見は熟

練した打者にとって最良のスイングが行えた際の動作の特徴を示すものであり、スイングのタイミングが外れた場合や真ん中でないコースを打撃する場合には、本論文の結果とは異なるメカニズムでバットを加速させている可能性があることを留意しておく必要がある。

2. 指導やトレーニングへの応用

野球の試合における打撃のパフォーマンスは、バットを大きく加速させることに加え、その位置や向きを投球されたボールの速さや軌道に合わせて巧みにコントロールすることで実現される打球の良し悪し（ヒットやホームランになったかどうか）によって決定される。そのため、打撃における最適な動作を普遍的なものとして定義することは困難である。本論文では、被験者の自己評価の高いスイングのみを扱ったことから、規定された環境下における最良のスイングが各打者について引き出せたものと仮定できる。そのため、本論文から得られた知見は、投球されたボールのスピードやコース、スイング開始のタイミングの良し悪しなどの影響により無数のバリエーションをもつと考えられる打撃動作の中で、各選手にとって最良のスイング動作の特徴を示すものである。さらに、各選手にとっての最良のスイングの力学的な特徴が被験者全員に共通するものであったため、現場における指導やトレーニングにおいて重点を置くべきポイントやスイング軌道を微調整するための方法論を提示できると考えられる。

本学位論文で得られた知見から、まずインパクト時のバットのヘッドスピードを増大させる方策について検討する。ヘッドスピードは打球の速度や飛距離を大きくするために重要な因子であるが、指導現場では、鋭い打球を放つためにはインパクトの瞬間にバットでボールを『押し込む』ことを意識することが重要視されている（應武 2009, 古田 2010, 平野と菊池 2015）。そのため、打撃練習の一部には、バットでタイヤやサンドバッグを強く叩いたり、インパクト時の打撃姿勢を保持したままバットでそれらを押しついたりする練習が存在する。これは、選手や指導者がインパクトにおいてバットが投球されたボールの勢いに押し負けないようにスイングすることで鋭い打球を放つことができると考えているためと推察される。しかしながら、バットとボールが接触している時間は極めて短く、インパクトの瞬間に打者の両手がバットに加えた力がバットの運動に影響を及ぼすまでにボールはバットから離れている（Nathan 2000）。つまり、鋭い打球を放つためには、ボールを押し込むことを意識した練習は効果的とは言えない。緒論で述べたように、バット

がボールに衝突するまでのスイングにおいてバットを十分に加速させ、バットの芯付近で正確にインパクトすることで鋭い打球を放つことができる。本論文では、バットのヘッドスピードは主に両手部がバットの長軸に対してグリップエンド方向に加えた力によって増加しており、この力はインパクトの約 0.15 秒前（図 3-1-5a, 踏出し足の踵が接地した直後：表 2-1）からヘッドスピードの増加に貢献していることを示した。その一方で、現場において重要視されているバットを押し込む力（グリップエンドに対するヘッド速度方向への力 Fy_s^H ）は、ヘッドスピードを僅かに減少させる効果を有していた（図 3-1-5a, 3-2-5a）。以上のことから、インパクト時のヘッドスピードを増大させるには、バットヘッドが加速し始めた直後からインパクトまで、両手部がバットのグリップエンド方向へ加える力が大きくなるようにスイングすることが重要であると言える。グリップエンド方向への力を大きく発揮できるようにするには、本章で考察したようにスイング局面を通してバットを体幹から遠ざけずに身体を高速に回転させる、つまりシステムの角運動量を増大させることが重要となる。システムの角運動量は、踏出し足をホームベース方向に強く踏み込むことで、踏出し足に作用する地面反力によってシステム重心まわりに大きなモーメントを生じさせることで増大できる可能性がある（矢内 2007）。また、矢内（2007）は踏出し足をシステム重心から遠ざけて踏み込むことで、踏出し足に作用する地面反力のモーメントアームを増加させ、システム重心まわりのモーメントを最大化することができることを示唆している。このように、踏出し足に作用する地面反力のモーメントを効果的に利用されるような指導が、結果的にシステムの角運動量の増大に繋がると考えられる。さらに、第 2 章の結果から体幹を高速度で捻る（骨盤に対する胸郭の回転速度を高める）こともシステムの角運動量を増大させるために重要であると推察されることから、スイング局面前半の打撃動作を意識したロープの牽引（Higuchi et al. 2013, 図 4-3）やメディシンボールを用いたサイドスローといったトレーニングを行うことは、ヘッドスピードを増加させるために効果的であると言える。

次に左右方向へ打球を打ち分ける際のバット角度のコントロール方法について、右打者

を例にして検討する。城所ら（2013）によると，3種の打球方向（レフト，センター，ライト）において，ヘッドスピードや打球スピードが大きくなるバット角度は一致しておらず，各方向への打球スピードを最大化するにはインパクト時においてバットの打撃面を打ちたい方向へ向けることが重要であるという。つまり，左右に鋭い打球を放つにはバットを水平面上に投影した角度（バット水平角）を調整する技術が必要となる。第3章では，打球方向に関係なく，バット水平角を生み出す主な原動力は両手トルクであることを示した。そして，両手トルクがバット水平角の主な原動力になった要因は，両手合力のモーメントが打撃とは反対方向へバットを回転（打者を頭上からみてバットを時計まわりに回転）させる働き（負の貢献）を有していたために，インパクトにおいて通常の打撃ポイントまでバットを回転させるために，両手トルクが両手合力のモーメントによる負の貢献を上回る正の貢献をもたらす必要があったためであると推察した。このことは，インパクト時のバット水平角は，両手トルクだけではなく両手合力のモーメントを変化させることによっても調整可能であることを示している。

引っ張りとし打ちのスイングにおけるバットに作用する力を比較した第3章2節では，バット水平角に対して引っ張りの方が両手トルクによる正の貢献が小さく，両手合力のモーメントによる負の貢献も小さいことを明らかにした（図3-2-6a）。この結果を踏まえて，第3章2節では，引っ張りを行うためにはインパクト直前0.05秒前から両手合力をバット長軸と一致させるか，打者を頭上からみてバットを反時計まわりに回転させるモーメントが生じるようにスイングする（図3-2-8）ことで，両手合力のモーメントによる打撃方向へのバットの回転を抑制する効果を減少させることが重要であることを示唆した。また，同時点（インパクト直前0.05秒前）からライト方向または投手方向に両手合力を加えてスイングすることで，両手合力のモーメントによるバットの回転を抑制する効果を増大させ，流し打ちを行うことが可能になる。これらの示唆は，打球方向によって打撃動作を変える必要があり，流し打ちを行う際はバットの先端をインコースからアウトコースに押し出すようにスイングすべきであるという指導方法（ウィリアムズとアンダーウッド 2000，古

田 2010) を支持するものであると言える。バット水平角を調整して打球を打ち分けることはスイングの開始時間を変えることでも可能 (McIntyre and Pfautsch 1982) であるが、打者が意図した時間にスイングを開始できなかつたとしても、上述したように左右各手部がバット長軸に対して加える力の向きを変化させることでも、打ち分けが行えることが示唆された。

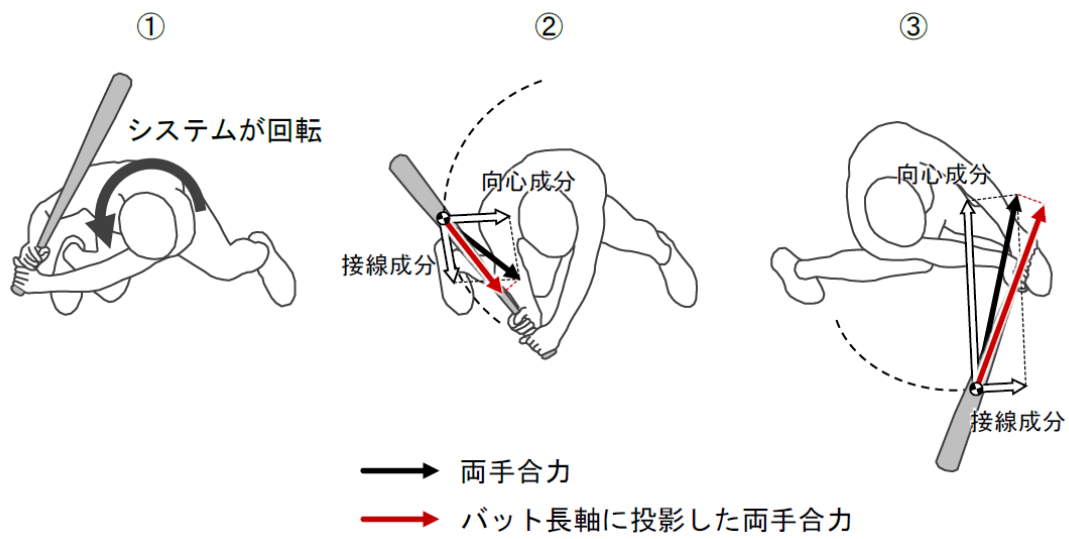


図 4-1 ヘッドスピードの上昇と同期してグリップエンド方向への両手合力が増加するメカニズム。①システムが回転することにより，②バット重心が角加速する。③バット重心がさらに加速することにより，バット重心を曲線軌道で移動させるための向心方向への加速度が大きくなる。

表4 ティー打撃とフリー打撃のスイングパラメータ.

	ティー打撃	フリー打撃	p値
インパクト直前のヘッドスピード(m/s)	35.5 ± 2.0	34.4 ± 2.0	0.000 *
スイング時間(s)	0.167 ± 0.017	0.157 ± 0.016	0.000 *
バット水平角(°)			
スイング開始時	-231 ± 17	-216 ± 18	0.000 *
インパクト時	-4 ± 6	-3 ± 6	0.316
変化量	227 ± 16	213 ± 18	0.000 *
バット鉛直角(°)			
スイング開始時	-30 ± 8	-39 ± 6	0.000 *
インパクト時	25 ± 3	23 ± 3	0.011 *
変化量	55 ± 10	62 ± 7	0.000 *

*: 有意差あり

側方からみた軌道

頭上からみた軌道

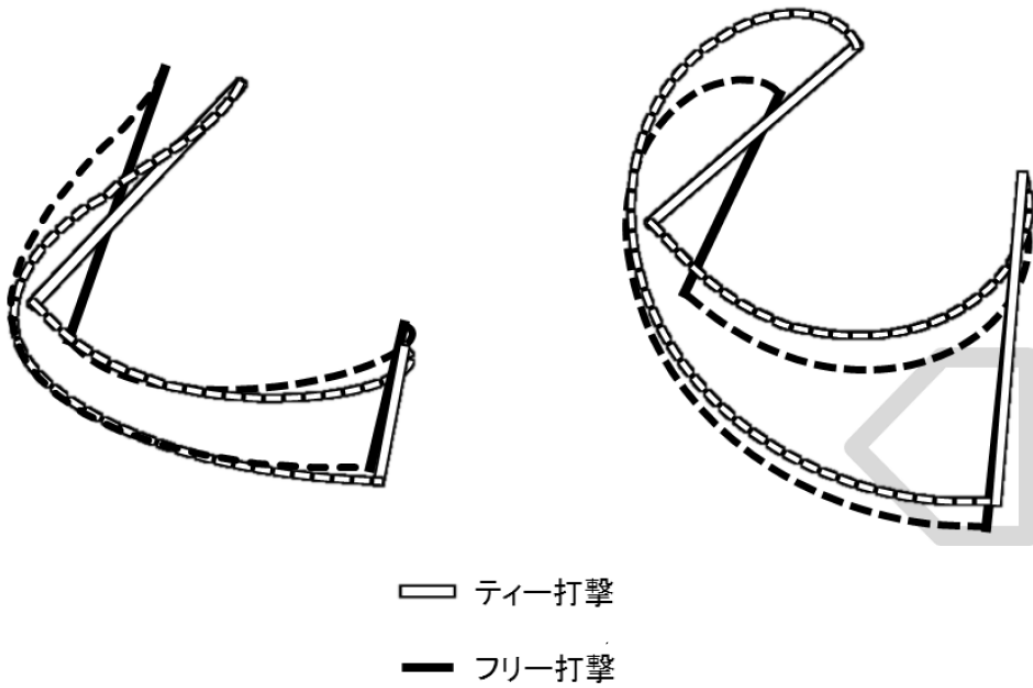


図 4-2 ティー打撃とフリー打撃のスイング開始からインパクトまでのスイング軌道
(右打者 1 名の典型例) .

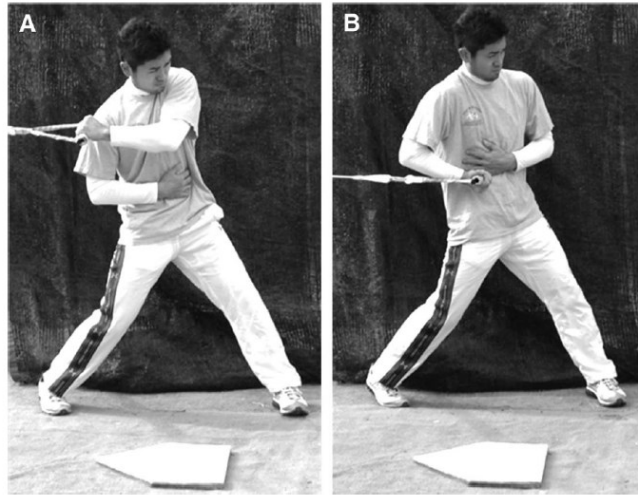


図 4-3 ヘッドスピードを増加させるための牽引アイソメトリックトレーニング
(Higuchi et al., 2013 より引用) . Higuchi et al. は, 大学野球選手に A と B のトレーニングを 2 か月間 (4 セット×5 秒, 週 3 回) 行わせたところ, ヘッドスピードが平均で 3.5% 向上したことを報告した.

第5章 結論

本学位論文は、熟練した野球打者の打撃動作を対象として、①身体の各関節運動が生み出し得るバットのヘッドスピード、②打者の全身運動によってもたらされる力がバットのヘッドスピードと方位変化に与える効果と打球を左右方向へ打ち分けた際の力の特徴を明らかにした。その結果、打球方向に係わらずインパクト時のバットのヘッドスピードの大半は、打者の身体が高速に回転することに伴い、身体と一体となって加速するバットの曲線軌道を維持するために必要な力の一部が、両手部を介してバットの長軸方向（グリップエンド方向）に作用し続けることによって生み出されていることが示唆された。また、バットの方位変化について、バットの水平面上の角度は、両手部が加えた力のモーメントによるブレーキ効果を上回る偶力の角力積によって生み出されており、バットヘッドの下方への傾斜は力のモーメントの角力積が原動力となって生み出されていることが明らかとなった。さらに、左右方向への打球の打ち分けは、両手部がバットに加える力の方向を微調整することによって行われていることが示された。

参考文献

- 阿江数通, 小池関也, 川村卓 (2013): 打点高の異なる野球ティー打撃動作における左右各手のキネティクスの分析. *バイオメカニクス研究* 17 (1), 2-14
- 阿江数通, 小池関也, 川村卓 (2014): 打点高の異なる野球ティー打撃動作における左右上肢のキネティクスの分析. *体育学研究* 59 (2), 431-452
- Adair RK (2002): *The physics of baseball*, 3rd edition. HarperCollins, New York
- 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
- ベアー FP, ジョンストン ER (長谷川節 訳) (1982): *工学のための力学〈上〉* 原著改訂第3版. 101-111, ブレイン図書出版, 東京
- ボイル M (中村千秋 監訳) (2007): *写真でわかるファンクショナルトレーニング*. 大修館書店, 東京
- Breen JL (1967): What makes a good hitter ?. *Journal of Health, Physical Education, Recreation* 38(4), 36-39
- Cross R (2009): Mechanics of swinging a bat. *American Journal of Physics* 77(1), 36-43
- Elliott BC, Marshall RN, Noffal GJ (1995): Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of Applied Biomechanics* 11, 433-442
- 古田敦也 (2010): *フルタの方程式 バッターズ・バイブル*. 朝日新聞出版, 東京
- Giakas G, Baltzopoulos V, Bartlett RM (1998): Improved extrapolation techniques in recursive digital filtering: a comparison of least squares and prediction. *Journal of Biomechanics* 31, 87-91
- Gordon BJ, Dapena J (2006): Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences* 24 (1), 31-49
- Hay JG, Reid JG (1988): *Anatomy, mechanics, and human motion*, 2nd edition.

Prentice-Hall, Englewood Cliffs

Hay JG (1993): The Biomechanics of sports techniques. 4th edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River

Hibbeler RC (2013): Engineering mechanics: Statics and Dynamics. Thirteenth edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River

Higuchi T, Nagami T, Mizuguchi N, Anderson T (2013): The acute and chronic effects of isometric contraction conditioning on baseball bat velocity. *Journal of Strength and Conditioning Research* 27(1), 216-222

平野裕一, 菊池壮光 (2015): 最速上達バッティング. 成美堂出版, 東京

平野裕一, 宮下充正 (1983): 野球の打撃の基本的動作に関する研究. 身体運動の科学 V スポーツ・バイオメカニクスへの挑戦. 杏林書院, 東京

Inkster B, Murphy A, Bower R, Watsford M (2011): Differences in the kinematics of the baseball swing between hitters of varying skill. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43(6), 1050-1054

川村卓, 功刀靖雄, 阿江通良 (2000): 熟練野球選手の打撃動作に関するバイオメカニクス的研究～バットの動きに着目して～. *大学体育研究* 22, 19-32

川村卓, 島田一志, 高橋佳三, 森本吉謙, 小池関也, 阿江通良 (2008): 野球の打撃における上肢の動作に関するキネマティクスの研究: ヘッドスピード上位群と下位群のスイング局面の比較. *体育学研究* 53 (2), 423-438

城所収二, 近田彰治, 矢内利政 (2012): 『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. *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス* 2012 講演論文集 No.12-39, 206-213

城所収二, 近田彰治, 矢内利政 (2013): 野球のバッティングにおける左右への打ち分けを可能にするバット角度. *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス* 2013 講演論文集, 119

- 城所収二, 若原卓, 矢内利政 (2012): 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 16 (4), 220-230
- 小池関也 (2004): 両手打撃動作を解き明かすセンサー打具の開発. バイオメカニクス研究 8 (3), 179-184
- 小池関也 (2010): 力覚検出型センサーバットの開発. 機能材料 8(30), 13-17
- 小池関也, 阿江数通 (2012): 野球打撃動作のバイオメカニクス. 体育の科学 62 (10), 773-781
- 小池関也, 川村卓, 阿江通良 (2008): 野球打撃動作のバットヘッド速度生成における左右上肢の動力学的分析. ジョイント・シンポジウム 2008 講演論文集, No.08-23, 117-122
- 小池関也, 川村卓, 阿江通良 (2009): バットヘッドコントロールに関する上肢の順動力学的分析. ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集 No.09-45, 234-239
- 河内まき子 (2012): AIST 日本人の手の寸法データ. <https://www.dh.aist.go.jp/database/hand/index.html>
- Kreighbaum E, Barthels KM (1990): Biomechanics, A qualitative approach for studying human movement, 3rd edition. Macmillan, New York
- 功刀靖雄 (1999): アマチュア野球教本Ⅲ 攻撃のマニュアル. ベースボール・マガジン社, 東京
- McIntyre DR, Pfausch EW (1982): Kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. Research Quarterly for Exercise and Sport 53(3), 206-213
- Messier SP, Owen MG (1984): Bat dynamics of female fast pitch softball batters. Research Quarterly for Exercise and Sport 55(2), 141-145
- Messier SP, Owen MG (1985): The mechanics of batting: analysis of ground reaction forces and selected lower extremity kinematics. Research Quarterly for Exercise and Sport 56(2), 138-143

- Messier SP, Owen MG (1986): Mechanics of batting: effect of stride technique on ground reaction forces and bat velocities. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 57(4), 329-333
- Milanovich M, Nesbit S (2014): A three-dimensional kinematic and kinetic study of the college-level female softball swing. *Journal of Sports Science and Medicine* 13(1). 180-191
- 宮西智久 (2006): 打動作と体幹・四肢の角運動量～野球のバッティングの場合～. *体育の科学* 56 (3), 181-186
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功刀靖雄, 岡田守彦 (1996): 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究. *体育学研究* 41, 23-37
- 森下義隆, 平野裕一, 矢内利政 (2013): 野球のバッティングにおけるバットヘッド速度に対する体幹および上肢のキネマティクスの貢献. *バイオメカニクス研究* 17 (4), 170-180
- Nathan A (2000): Dynamics of the baseball–bat collision. *American Journal of Physics* 68(11), 979-990
- 日本プロフェッショナル野球組織・全日本野球協会 (2015): 公認野球規則. ベースボール・マガジン社, 東京
- 小田伸午, 森谷敏夫, 田口貞善 (1991a): 野球のティーバッティングにおける地面反力レギュラー選手と非レギュラー選手の比較一. *Japanese Journal of Sports Science* 10(1), 80-87
- 小田伸午, 森谷敏夫, 田口貞善, 松本珠希, 見正富美子 (1991b): 地面反力からみた野球のティーバッティング技術. *体育学研究* 36, 255-262
- 應武篤良 (2009): 1 番になれるバッティング上達テクニック, 成美堂出版, 東京
- Race DE (1961): A Cinematographic and mechanical analysis of the external

- movements involved in hitting a baseball effectively. *Research Quarterly* 21(3), 394-404
- Shaffer B, Jobe FW, Pink M, Perry J (1993): Baseball batting. An electromyographic study. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 292(July), 285-293
- 篠塚和典 (2013): 流し打ちの極意. ベースボール・マガジン社, 東京
- Slater-Hammel, AT, Stumpner RL (1950): Batting Reaction-Time. *Research Quarterly* 21(4), 353-356
- Slater-Hammel, AT, Stumpner RL (1951): Choice Batting Reaction-Time. *Research Quarterly* 22(3), 377-380
- Sprigings EJ, Marshall R, Elliott BC, Jennings L (1994): A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *Journal of Biomechanics* 27, 245-254
- Tanabe S, Ito A (2007): A three-dimensional analysis of the contributions of upper limb joint movements to horizontal racket head velocity at ball impact during tennis serving. *Sports Biomechanics* 6 (3), 418-433
- 田子孝仁, 阿江通良, 藤井範久, 小池関也, 川村卓 (2006): 野球における内外角の打撃ポイントが打撃動作に及ぼす影響. *バイオメカニクス研究* 10(4), 222-234
- 田内健二, 南形和明, 川村卓, 高松薫 (2005): 野球のティーバッティングにおける体幹の捻転動作がバットスピードに及ぼす影響. *スポーツ方法学研究* 18 (1), 1-9
- 鳥越規央 (2014): 勝てる野球の統計学. 岩波書店, 東京
- Welch CM, Banks SA, Cook FF, Draovitch P (1995): Hitting a baseball: a biomechanical description. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 22(5), 193-201
- ウィリアムズ T, アンダーウッド J (池田郁雄 訳) (2000): バッティングの科学. ベースボール・マガジン社, 東京
- Winter DA (1990): *Biomechanics and motor control of human movement*, 2nd edition.

John Wiley & Sons, New York

矢内利政 (2007): 野球のバッティングにおける重心移動と回転運動—Deterministic model を利用した分析—. バイオメカニクス研究 11 (3), 200-212

谷中拓哉, 城所収二, 近田彰治, 矢内利政 (2014): 野球のバッティングにおけるバットのローリング発生メカニズム. バイオメカニクス研究 18 (2), 53-62

Yu B, Gabriel D, Noble L, An KN (1999): Estimate of the optical cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter. J Appl Biomech 15, 318-329

謝辞

本学位論文の執筆にあたり，多大なるご指導を賜りました早稲田大学スポーツ科学学院の矢内利政教授に心から感謝申し上げます．矢内先生には，博士課程からお世話になり，研究指導だけではなく，研究者としての心得や誠実さを教えていただきました．矢内先生から学んだことは，私の人生において貴重な財産です．本当にありがとうございました．

本学位論文の副査を引き受けて下さった早稲田大学スポーツ科学学院の彼末一之教授と土屋純教授，国立スポーツ科学センターの平野裕一先生に深く感謝致します．彼末先生と土屋先生には，他分野ならではの視点からご指摘やアドバイスをいただき，本論文を完成させる上で大変有益なものとなりました．また，平野先生は私が博士課程に入学する前，貴センターで勤務していた頃からご指導していただき，退職後も研究の進捗具合を気にかけて応援して頂きました．

矢内研究室で野球研究に携わってきた近田彰治さん，永見智之さん，城所収二さん，谷中拓哉さんには，実験の実施からデータ分析やその解釈に至るまで手厚い御支援を頂きました．深く感謝致します．

実験の被験者として御協力いただいた大学硬式野球部，社会人硬式野球部，プロ野球チームの皆様には感謝申し上げます．また，矢内研究室の大学院生の皆様にも感謝しております．本論文は，私に関わる全ての方々のご支援のおかげで執筆することができました．本当にありがとうございました．

2016年1月 森下 義隆