

中京大学博士審査学位論文
大学院体育学研究科

野球のバッティングにおけるバットヘッドの
加速メカニズムに関するバイオメカニクス的研究

Biomechanical study on the acceleration mechanism of
the bat head in baseball batting

2018年3月19日 学位授与
中京大学大学院 体育学研究科 体育学専攻
堀内 元

目 次

第1章 序論

1. 研究小史	1
2. 本論文の研究課題および目的	6

第2章 バットヘッドスピードの増大に関連するバットのダイナミクス

1. 目的	7
2. 方法	
2.1. 分析対象者	7
2.2. データ収集	7
2.3. バットのキネマティクスおよびキネティクス	9
2.4. データ処理	11
2.5. トスされたボールの位置およびスピード	12
2.6. 統計分析	12
3. 結果	
3.1. バットヘッドスピードとトスされたボールの位置およびスピード	13
3.2. バットのキネマティクス	13
3.3. バットのキネティクス	14
4. 考察	
4.1. トスされたボールの位置およびスピード	19
4.2. バットのダイナミクス	19
5. 概括	23

第3章 下肢および体幹における力学的エネルギーの流れ

1. 目的	24
2. 方法	
2.1. データ収集	24
2.2. データ処理	24
2.3. 算出項目	29
2.4. 統計分析	30
3. 結果	
3.1. セグメントの力学的エネルギーの変化	31
3.2. 力学的エネルギーの流れ	32
3.3. 力学的エネルギーの発生・吸収	35
4. 考察	
4.1. 力学的エネルギーの流れおよび発生・吸収	38
4.2. 力学的エネルギーとバットヘッドスピードの関係	39
5. 概括	41

第4章 力学的エネルギーの生成に関連する股関節のダイナミクス

1. 目的	42
2. 方法	
2.1. データ収集	42
2.2. データ処理	43
2.3. 算出項目	43
2.4. 統計分析	44

3. 結果	
3.1. 関節角度	45
3.2. 投手側の股関節における関節トルク, 関節角速度, 関節トルクパワー	47
3.3. 捕手側の股関節における関節トルク, 関節角速度, 関節トルクパワー	49
3.4. 関節トルクによる力学的仕事	51
4. 考察	
4.1. 投手側の股関節について	53
4.2. 捕手側の股関節について	54
5. 概括	55
第5章 総合考察	56
第6章 総括	61
謝辞	63
文献	64

本論文は以下の 3 編の論文に基づいて構成される。

1. Horiuchi, G. and Sakurai, S. (2016) Kinetic analyses on increase of bat head speed in baseball batting. *International Journal of Sport and Health Science*, 14: 94-101. (第 2 章)
2. 堀内元・中島大貴・桜井伸二 (2017) 野球のバッティングにおける下肢および体幹の力学的エネルギーの流れ. *体育学研究*, 62(2): 575-586. (第 3 章)
3. 堀内元・中島大貴・桜井伸二 (in preparation) 野球のバッティングにおける股関節のダイナミクス. (第 4 章)

第1章 序論

1. 研究小史

野球のバッティングは、打者がバッタースボックスの中で打撃姿勢をとり、相手投手が投げるボールに対してバットを振り、バットとボールを衝突させることによってボールを打ち返すことである。打者は、打率やホームラン数、打点数などによってパフォーマンスを評価されることがあるが、成功する打者になるためにはバットのスイング速度を向上させるべきであるといわれている (Szymanski et al., 2009)。バットのスイング速度を増大させることの利点には、1. スイング時間の短縮、2. 判断時間の増大、3. 打球速度の増大が挙げられる。特に、打球速度が増大することは、打球が速くかつ遠くへ飛行することにつながり、相手守備が困難になることから、打者の出塁率の向上が期待される。メジャーリーグベースボールのスタットキャスト (MLB.com, online) によると、2016 年シーズンにおける打球速度 50 傑の結果は、出塁数が 33、長打数が 21 と極めて優れているといえる。また、この 50 傑についての投球速度と打球速度の相関関係が極めて低いことから ($r=0.012$, *n.s.*)、打球速度がインパクト時のバットヘッドスピードに強く依存することが推測される。これらのことから、野球のバッティングに関する先行研究の多くでは、インパクト時のバットヘッドスピードに関連する動作について検討されてきた。

矢内 (2007) は、インパクト時のバットヘッドスピードを決定する力学的要因を分析するための Deterministic model を構築している (図 1-1)。Deterministic model は、パフォーマンスの優劣を決定する成果とそれらを決定する要因との関係を系統的に示したものであり、成果と要因の関係が力学的または数学的根拠で確定的に説明されている。構築されたモデルでは、インパクト時のバットヘッドスピードを決定する要因を、バットと身体を合わせたシステムの重心移動によって生じるもの (左側 2 段目) とシステム重心に対するバットヘッドの相対運動によって生じるもの (右側 2 段目) に分けて解釈している。モデルの解釈によると、システムの重心移動については、打者の両足に作用する地面反力がバットと身体を合わせたシステムの重心速度に影響を及ぼし、インパクト時のバットヘッドスピードが変化することが確認できる (左側 3 段目以降)。システム重心に対するバットヘッドの相対運動については、システムに対するバットヘッド速度を最大化するためには、バットの角速

度を増大させることでグリップに対するバットヘッドの相対速度が増大することが確認できる。加えて、そのためには地面反力から得られる外力モーメントによってシステムの角運動量を最大化し、その角運動量をバットへ伝達させることが重要であるといえる(右側 3 段目以降)。実際のバッティング動作を分析した先行研究(平野, 1984)では、水平面において左右各足によって地面に発揮される力の向きは互いに反対であり、これら 2 つの力が偶力のように作用することによって水平面におけるシステムの回転運動が生じる様子が報告されている。加えて、インパクト時のバットヘッドスピードの大きさが異なる打者 2 名を比較した研究(宮西, 2006)では、バットヘッドスピードが大きい打者の方が水平面におけるシステムの角運動量が大きいことが報告されている。しかしながら、モデルによって示されたインパクト時のバットヘッドスピードを増大させるための方策は、バットと身体を合わせた「システム」としてみた際のものであり、身体における各関節や各セグメントの運動については言及されてはいない。

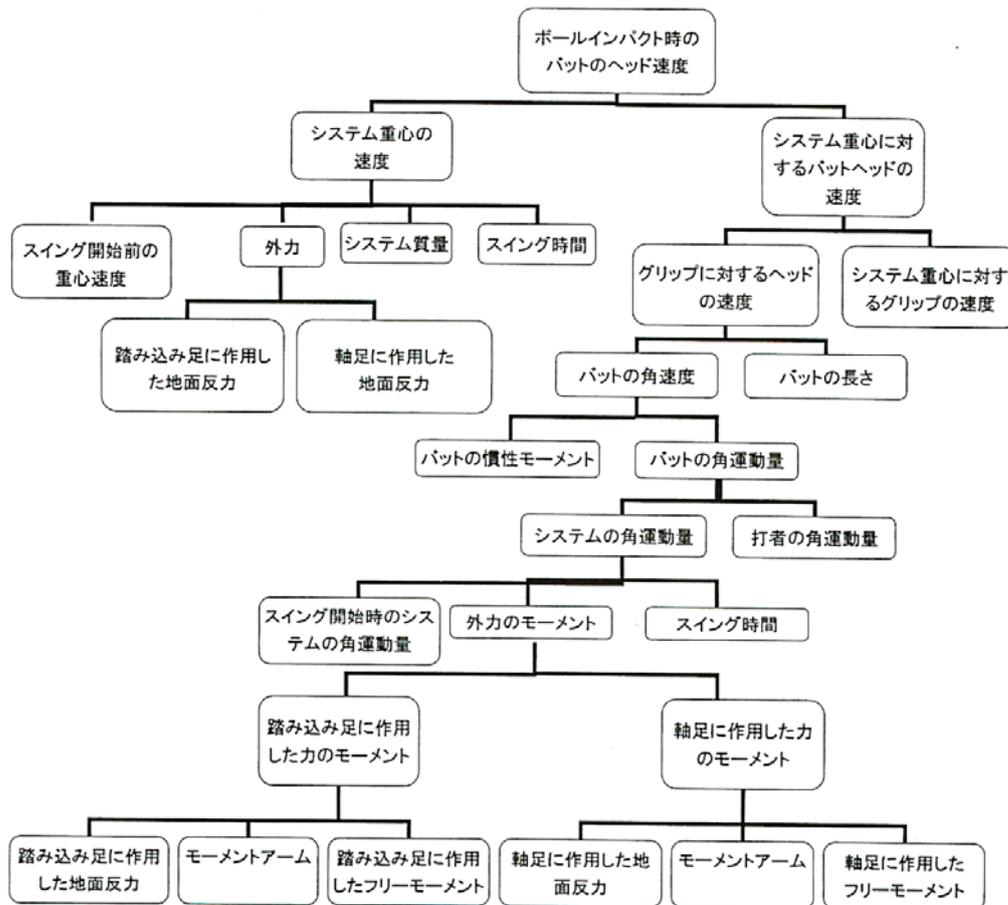


図1-1 バットヘッドスピードを決定する要因によって構築されたDeterministic model
(バイオメカニクス研究 矢内, 2007)

野球のバッティングに関する最初のキネマティクスの研究は、Race (1961) が 17 名のプロ野球選手を対象にバッティング動作を 2 次元的に映画撮影し、バッティングのメカニズムについて定量的および定性的分析を行ったものである。その後、様々な野球のバッティング動作に関するキネマティクスの研究 (Escamilla et al., 2009; Inkster et al., 2010; 川村ほか, 2008; McIntyre and Pfautsch, 1982; 森下ほか, 2013; Race, 1961; Szymanski et al., 2007; 田内ほか, 2005) において、インパクト時のバットヘッドスピードと関連する動作について検討されてきた。これらの研究において、膝関節角度や体幹の回旋角速度および捻転角速度、バットグリップ側の肩関節角度、肘関節の伸展角速度などがインパクト時のバットヘッドスピードの増大に対して重要な動作であると考察されている。しかしながら、上述するキネマティクスの変数は、連続したバッティング動作の一部でしかなく、バットヘッドを加速させる直接的要因ではない。そのため、バットヘッドの加速メカニズムを解明するためには、バッティング動作中にバットグリップに作用する力やトルク、身体各関節が発揮するトルクの定量化が必要である。

Milanovich and Nesbit (2014) は、逆動力学演算を用いて、ソフトボールのバットスイング中に打者が両手部によってバットグリップに作用させた正味の力およびトルクを推定している。対して、Koike et al., (2004) は、バットグリップにストレインゲージを埋設した特殊なセンサーバットを開発し、バットスイング中に左右各手部がバットグリップに対して発揮した力およびトルクをそれぞれ直接測定した。これらの力学的研究によって、バットスイングに関する基礎的メカニズムが明らかにされた。加えて、野球のバットスイングの力学的分析を行った近年の研究 (阿江ほか, 2013; 森下ほか, 2015) からは、バット長軸方向への力がインパクト時のバットヘッドスピードに対する貢献度が大きいと報告されている。このバット長軸方向への力によるバットの加速メカニズムは 2 つに大別できると考えられる。1 つはバット長軸方向への力によってスイング中におけるバットの曲率半径が短縮することでバットが加速されるメカニズム、もう 1 つはバット長軸方向への力によってバットへ力学的エネルギーが流入することでバットの速度が増大するというメカニズムである。しかしながら、どちらのメカニズムによってバットが加速されるかについては先行研究では言及されておらず (**問題点 1**)、野球のバッティングにおけるバットヘッドの加速メカニズムが精緻に解明されているとはいえない。

前者のメカニズムであれば野球のバッティングにおけるバットの加速メカニズムはハンマー投げにおけるハンマーヘッドの加速メカニズムに類似し、後者のメカニズムであれば力学的エネルギーがバットへ伝達されるまでの様相の記述や力学的エネルギーの発生源の特定が次なる研究課題になりうる。

野球のバッティングにおける指導の現場では、下肢の動作について重要視されることが多い。野球のバッティングに関する指導書の記述を抽出した研究(金堀ほか, 2012)においても、指導における意識の対象は身体部位では下肢についての表出数が最も多かったと報告されている。野球のバッティング動作中における下肢の筋電図を測定した研究(Nakata et al., 2013; Shaffer et al., 1993)では下肢の高い筋活動レベルが報告されており、下肢の筋群がバッティング動作に大いに動員されていることがわかる。また、野球あるいはソフトボールのバットスイングを行う際には、力やエネルギーを下肢から体幹、上肢、そしてバットへ伝達させることを意識させるような用語が指導現場では頻繁に耳にされる。野球のバッティングにおけるキネマティクスの研究(Escamilla et al., 2009)からも、関節角速度あるいはセグメント回転速度のピークが膝、腰、上腕、肘の順に出現し、その大きさも漸増していたことから、エネルギーが下肢から体幹、上肢、バットへと順次伝達されることが大きなバットヘッドスピードの獲得に貢献していると考察されている。野球あるいはソフトボールのバッティングにおける下肢の力学的研究では、骨盤の並進および回転運動に対する股関節トルクの作用について検討した研究が1例ずつ(Iino et al., 2014; 高木ほか, 2010)、下肢関節の力学的仕事を定量化した研究が1例(Ae et al., 2017)報告されているのみである。加えて、上述したような野球のバッティングにおける下肢や体幹の力学的エネルギーの流れについて定量化した研究は見当たらない(問題点 2)。野球のバッティング動作中における下肢および体幹の力学的エネルギーの流れおよび各関節で発生・吸収される力学的エネルギーを定量化することは、これまでの指導書の記述やキネマティクスの研究の考察などを科学的に検証し、裏付けることにつながる。加えて、インパクト時におけるバットヘッドスピードと下肢および体幹の力学的エネルギーの流れとの関係について検討することは、バットヘッドの加速メカニズムに関連する力学的情報の獲得が期待される。

2. 本論文の研究課題および目的

研究小史において野球のバッティング動作に関する先行研究を概観することで、以下の 2 点の問題点が指摘された。

1. 野球のバッティングにおいて、バット長軸方向への力はインパクト時のバットヘッドスピードに対する貢献度が大きいと報告されているが、どのようなメカニズムでこの力がバットヘッドの加速に貢献しているのか明らかにされていない。
2. 指導現場において重要視される下肢について、多くの下肢筋群がバッティング動作に動員されていることは報告されている。しかしながら、野球のバッティング動作中における下肢関節トルクによって発生・吸収された力学的エネルギーについて定量化した研究は 1 例のみであり、下肢から体幹にかけての力学的エネルギーの流れについて定量化した研究は見当たらない。

上述した問題点について明瞭に検討するため、野球のバッティング動作におけるバットヘッドの加速メカニズムについてバットの運動学的および力学的観点から明らかにすること(第 2 章)、下肢および体幹における力学的エネルギーの流れおよびその発生・吸収を定量化すること(第 3 章)を研究課題として設定した。そして、これらの研究課題について検討することで、野球のバッティングにおけるバットヘッドの加速メカニズムを明らかにすることを本論文の目的とした。

第2章 バットヘッドスピードの増大に関連するバットのダイナミクス

1. 目的

本章の目的は、野球のバッティングにおいてバットヘッドの加速メカニズムを運動学および力学的観点から明らかにすることである。

2. 方法

2.1. 分析対象者

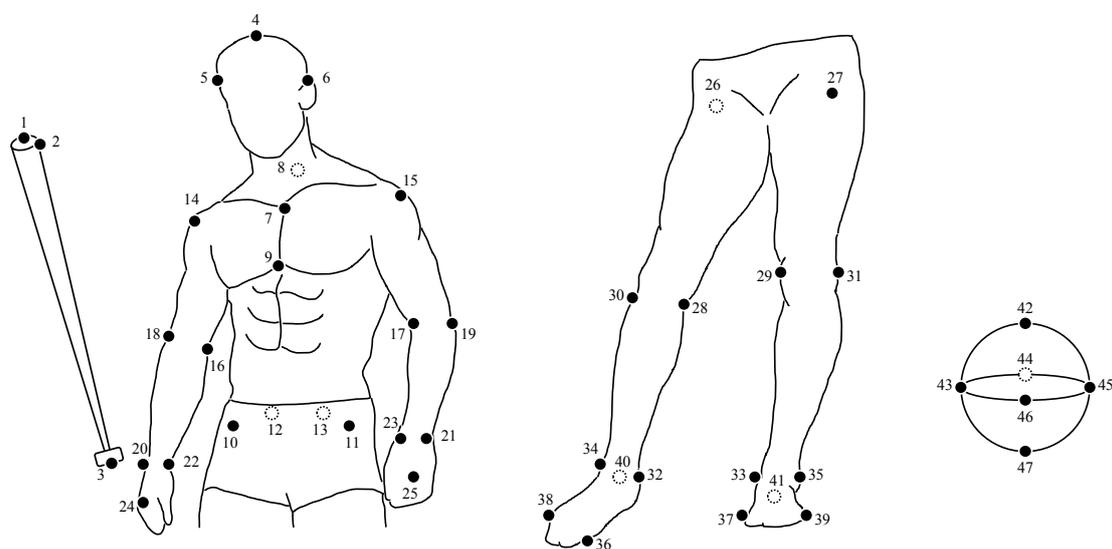
本章における分析対象者は、男子アマチュア野球選手 99 名(身長:172.6±5.6 cm, 体重:70.3±8.0 kg, 年齢:19.0±1.9 yrs, 競技歴:11.0±2.9 yrs)であった。なお、打者は、右打ちが 55 名、左打ちが 44 名であった。本論文における実験は、中京大学研究倫理審査委員会の承認を得て行われた(承認番号:2014-046)。分析対象者には、実験の目的および内容などを説明し、予め書面にて実験参加への同意を得た。

2.2. データ収集

バット(3 点)、分析対象者の身体特徴点(38 点)およびボール(6 点)に再帰反射マーカ―またはそのテープを貼付し(図 2-1)、最大努力によるトスバッティングを行わせた。トスは 3.2 m 離れた投手方向にあたる位置から一定のリズムで実験者から下手投げで投球され、各分析対象者のストライクゾーン中央にあたる位置を狙って行われた(図 2-2)。トスバッティング中における再帰反射マーカ―の軌跡をサンプリング周波数 250 Hz でモーションキャプチャーシステム(Vicon MX, Vicon Motion Systems, UK)を用いて記録した。同時に、トスバッティング中に両足に作用する地面反力をサンプリング周波数 1000Hz で 2 台のフォースプレート(9281B, Kistler)を用いてそれぞれ測定した。なお、実験で使用されたバットは硬式用木製バット(長さ:0.84 m, 質量:0.90 kg)、ボールはスポンジボール(直径:70 mm, 質量:20 g)であった。

以上の条件において、分析対象者の納得いく試技が 3 回得られるまでデータ収集は続けられた。その際、打者の姿勢が崩れた、トスされたボールがストライクゾーンを外れた、正確に打球でき

ていなかった試技は除外された。そして、バットとボールがインパクトした際のバットヘッドスピード（バットヘッドの先端部の変位を時間微分した合成速度）が最大の試技を分析対象とした。インパクトはバットヘッドの加速度が負の値を示した時点の 1 frame 前の時点として定義した。なお、左打ちの分析対象者に関しては、データ処理の前に左右を反転させ、右打ちの打者として後述するデータ処理を行った。



- | | | |
|---------------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1. Top of the bat head | 12, 13. Posterior superior iliac spine | 30, 31. Lateral epicondyle of femur |
| 2. Edge of the bat head | 14, 15. Acromion | 32, 33. Medial malleolus |
| 3. Bat grip | 16, 17. Medial epicondyle of humerus | 34, 35. Lateral malleolus |
| 4. Vertex | 18, 19. Lateral epicondyle of humerus | 36, 37. Base of 1st metatarsal |
| 5, 6. Tragus | 20, 21. Styloid process of ulnar | 38, 39. Base of 5th metatarsal |
| 7. Superior margin of the sternum | 22, 23. Styloid process of radial | 40, 41. Calcaneus |
| 8. 7th cervical vertebra | 24, 25. Base of 3rd metacarpal bone | 42 - 47. Ball markers |
| 9. Xiphoid process | 26, 27. Greater trochanter | |
| 10, 11. Anterior superior iliac spine | 28, 29. Medial epicondyle of femur | |

図2-1 再帰反射マーカの貼付位置

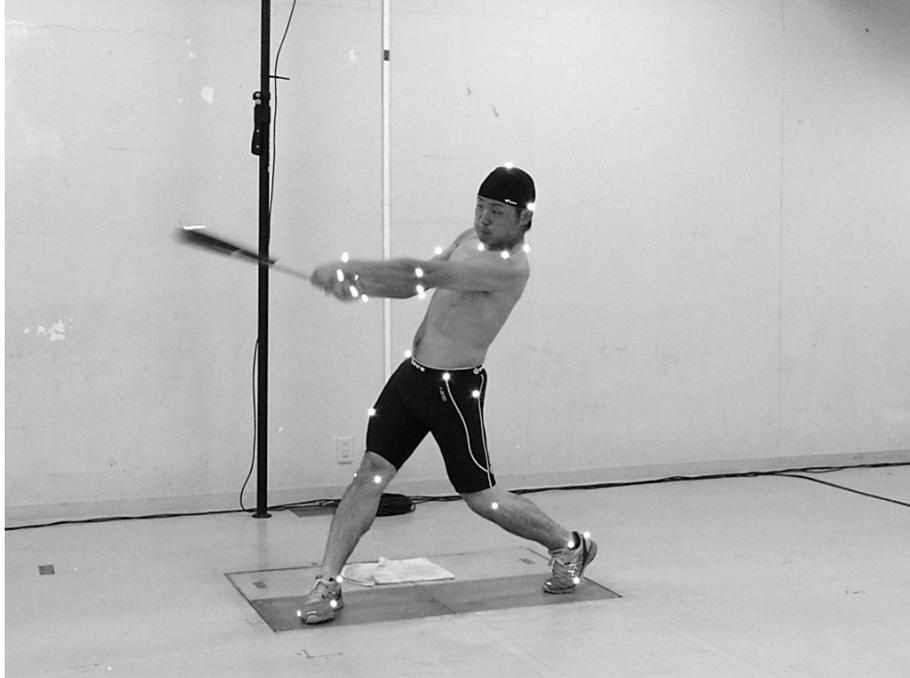


図2-2 データ収集の様子

2.3. バットのキネマティクスおよびキネティクス

バットのヘッドスピードおよび角速度は、バットヘッドの変位およびバットの角変位をそれぞれ時間微分することによって算出した。バットヘッドの曲率半径は、単位時間あたりにおけるバットヘッドの変位をバットヘッド軌跡の接線傾斜角度で除すことによって算出した。

図 2-3 は、バットに定義した局所座標系を示している。バットヘッドからバットグリップへ向かう単位ベクトルを Z_{bat} とし、バットヘッド速度を補助ベクトル S_{bat} とした。さらに、 S_{bat} と Z_{bat} の外積によって得られた単位ベクトルを X_{bat} とし、 Z_{bat} と X_{bat} の外積によって得られた単位ベクトルを Y_{bat} とした。そして、 X_{bat} 、 Y_{bat} 、 Z_{bat} を軸とする座標系をバットの局所座標系とした。逆動力学演算 (Winter, 2009) によってバットグリップに作用する力およびトルク (以下、グリップ力およびグリップトルク) を算出した。グリップ力およびグリップトルクの作用点は、左右の第3中手骨の midpoint とした。バットの重心

は測定され、バットヘッドからバットグリップを結んだ線分の 33.3%の位置であった。バットの慣性モーメントは、バットグリップを支点とした振り子運動の周期から算出した(長軸周り: $2.025 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 短軸周り: $0.047 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)。

グリップ力およびグリップトルクによるバットのパワーは、グリップ力とグリップ速度、グリップトルクとバットの角速度それぞれの内積によって算出した。また、それぞれのパワーを時間積分することによって力学的仕事を算出し、グリップ力およびグリップトルクによってバットに流入出した力学的エネルギーの指標とした(Gordon et al., 1980)。

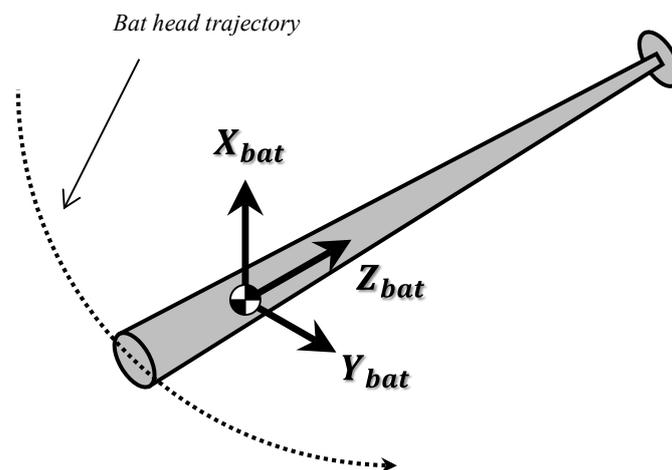


図2-3 バットに定義した局所座標系

2.4. データ処理

野球のバッティングでは、バットとボールのインパクトによってバットヘッドの急激な減速を生じることは周知である。このバットヘッドの急激な減速は、データを平滑化した際、インパクト付近におけるデータの深刻な歪みを生じさせる原因となる。そこで、本研究では、サッカーのキック動作における分析(Nunome et al., 2006)で用いられた平滑化手法によって、インパクトの影響を排除してデータの平滑化を行った。すべての変数を3次元の生データから算出し、インパクト直前(3 frame)からそれぞれの信号を1次式によって外挿する。さらに、4次のButterworth型ローパスデジタルフィルターによってカットオフ周波数25 Hzで平滑化した。

バットヘッドスピードが1 m/s以上に達した時点からインパクトした時点までを100%として時間を規格化した(図2-4)。

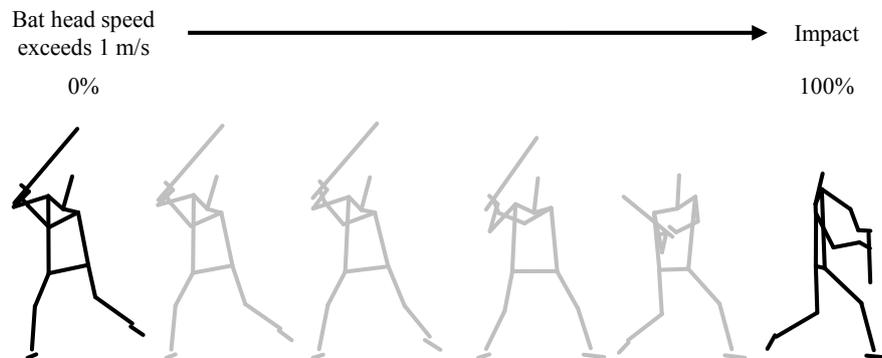


図2-4 分析範囲

2.5. トスされたボールの位置およびスピード

本論文におけるデータ収集では実験試技としてトスバッティングを採用しているため、トスされたボールの位置やスピードのばらつきによってバッティング動作に違いを生じさせる可能性がある。そのため、本論文ではインパクト時における打者の身体重心位置に対するボール位置およびボールスピードを算出し、これらのばらつきについて 3 次元的に検証した。なお、身体重心位置は日本人アスリートの身体部分慣性係数(阿江ほか, 1992)を用いて算出した。

2.6. 統計分析

インパクト時のバットヘッドスピードと力学的変数との間における Pearson の積率相関係数を各規格化時間で算出した(有意水準:0.1%)。

3. 結果

3.1. バットヘッドスピードとトスされたボールの位置およびスピード

インパクト時における打者の身体重心位置に対するボール位置は、投手方向へ 0.71 ± 0.17 m, 外角方向へ 0.61 ± 0.07 m, 鉛直下方向へ 0.11 ± 0.10 m であった。また、インパクト時におけるボールスピードは、 2.25 ± 0.79 m/s であった。

3.2. バットのキネマティクス

図 2-5 は、バットヘッドスピードとバットの角速度(図 2-5 左), バットヘッドの加速度と曲率半径(図 2-5 右)における平均値(±標準偏差)の変化を示している。インパクト時のバットヘッドスピードは、 33.8 ± 2.0 m/s であった。バットの角速度はバットヘッドスピードと同様の変化を示し、インパクト時において最大に達していた(2349.2 ± 146.7 deg/s)。バットヘッドの加速度はスイング開始から増大し、規格化時間 85%で最大に達した(292.3 ± 53.3 m/s²)。バットヘッドの曲率半径は単調増加を示し、インパクト時において最大に達していた(1.89 ± 0.11 m)。

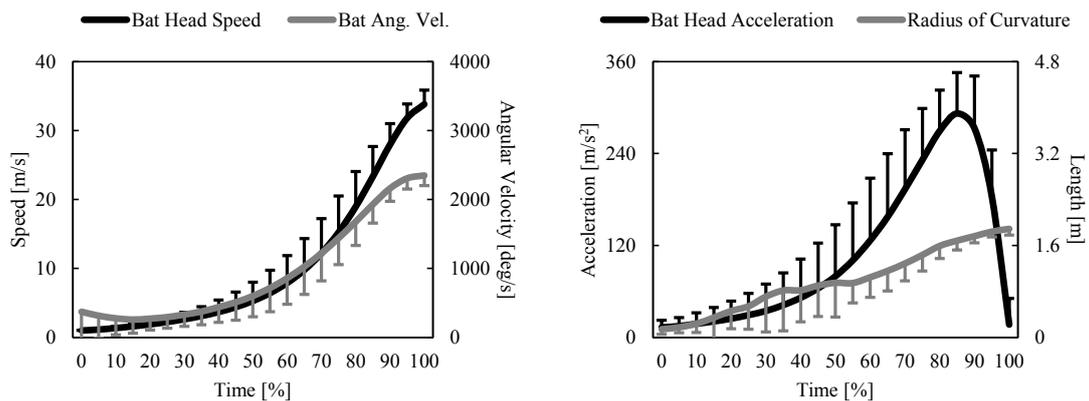


図2-5 バットのキネマティクス
(左: バットヘッドスピードとバットの角速度, 右バットヘッドの加速度と曲率半径)

3.3. バットのキネティクス

図 2-6 は、グリップ力(図 2-6 左)およびグリップトルク(図 2-6 右)の平均値(±標準偏差)の変化を示している。加えて、インパクト時のバットヘッドスピードと各規格化時間におけるグリップ力、グリップトルクとの相関係数の変化をそれぞれ示しており、有意水準はグレーで塗りつぶされている(図 2-6 下段)。 Z_{bat} 軸方向におけるグリップ力が規格化時間 60%から増大し、インパクト時において最大値に達していた(642.1±87.4 N)。インパクト直前において、 Z_{bat} 軸方向におけるグリップ力とインパクト時のバットヘッドスピードに有意な相関関係が認められた。対して、 X_{bat} 軸および Y_{bat} 軸方向におけるグリップ力は小さく、分析範囲を通してインパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係はほとんど認められなかった。 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは、規格化時間 50%以降において正の値を示し、規格化時間 75-80%でピークに達していた。しかしながら、 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは規格化時間 80%以降において減衰傾向を示し、インパクト時では負に転じていた。 Y_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは規格化時間 50%以降において負の値を示した。これらのグリップトルクは、分析範囲を通してインパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係はほとんど認められなかった。

図 2-7 は、グリップ力およびグリップトルクによるバットのパワーの平均値(±標準偏差)の変化を示している。加えて、インパクト時のバットヘッドスピードと各規格化時間におけるグリップ力およびグリップトルクによるバットのパワーとの相関係数をそれぞれ示しており、有意水準はグレーで塗りつぶされている(図 2-7 下段)。グリップ力によるバットの並進パワーは、規格化時間 75%以降において急激に増大し、インパクト時まで正の値を示していた。また、インパクト直前において(規格化時間 90-100%)、グリップ力によるバットの並進パワーは、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められた。グリップトルクによるバットの回転パワーは、規格化時間 50%以降において正の値を示していたが、インパクト時では負の値に転じていた。分析範囲を通して、グリップトルクによるバットの回転パワーは、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係はほとんど認められなかった。

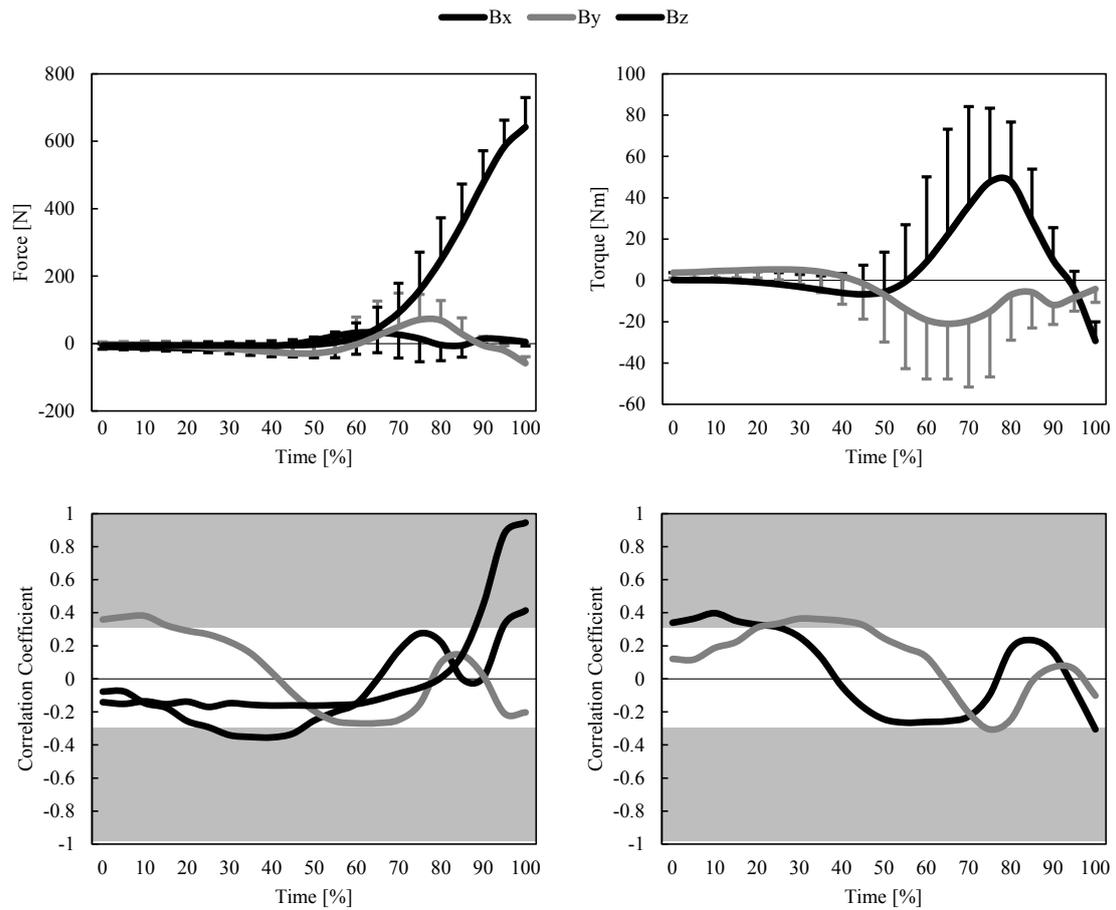


図2-6 バットのキネティクス(上段 左:グリップ力, 右:グリップトルク)とインパクト時のバットヘッドスピードとの相関係数の変化(下段)

塗りつぶし部分は有意な相関関係の範囲を意味する($p < 0.001$)

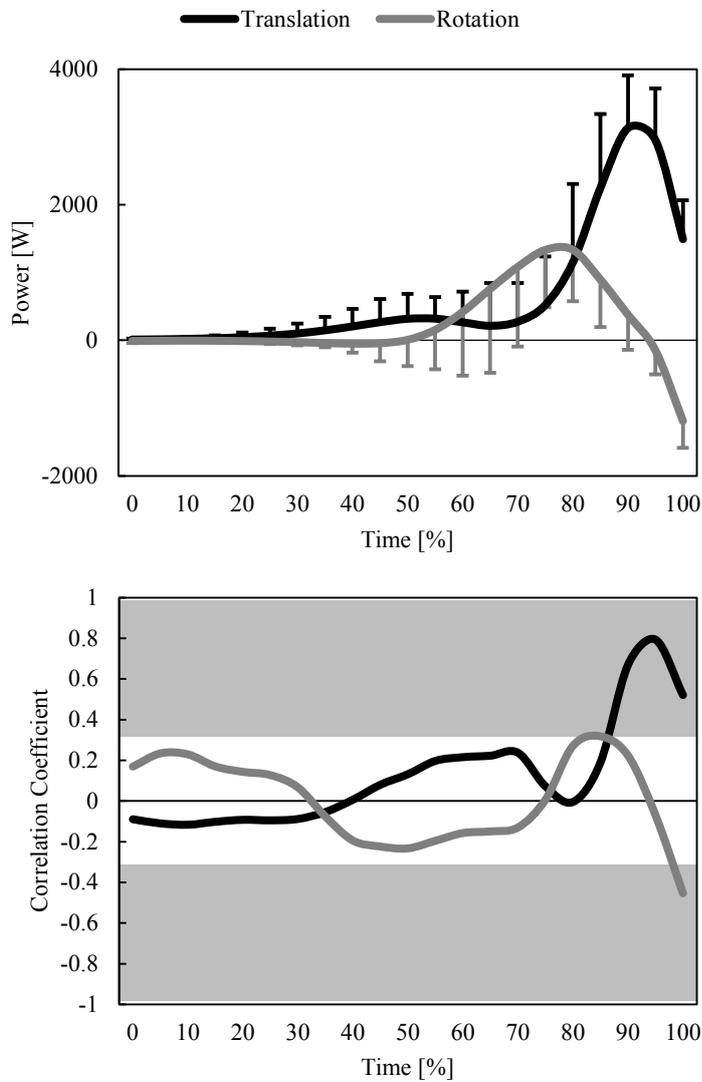


図2-7 グリップ力およびグリップトルクによるバットのパワー(上段)とインパクト時のバットヘッドスピードとの相関係数の変化(下段)

塗りつぶし部分は有意な相関関係の範囲を意味する($p < 0.001$)

図 2-8 は、グリップ力(左)およびグリップトルク(右)によってバットに流入出した力学的エネルギーの平均値(±標準偏差)を示している。なお、正の値はバットへ流入、負の値はバットから流出した力学的エネルギーの大きさをそれぞれ意味している。グリップ力によってバットへ流入した力学的エネルギーは 202.3 ± 38.6 J であり、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた ($r=0.826, p<0.001$)。また、グリップトルクによってバットへ流入した力学的エネルギーは 99.4 ± 20.4 J であり、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった ($r=0.111, n.s.$)。グリップトルクによってバットから流出した力学的エネルギーは 21.3 ± 9.8 J であり、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な負の相関関係が認められた ($r=-0.439, p<0.001$)。

図 2-9 は、インパクト直前(規格化時間 70-100%)における各規格化時間でのバットヘッドスピードと Z_{bat} 軸方向におけるグリップ力との関係を示している。バットヘッドスピードと平方は Z_{bat} 軸方向におけるグリップ力と比例関係にあり、両変数の間には極めて強い相関関係が認められた ($r=0.989, p<0.001, n=693$)。

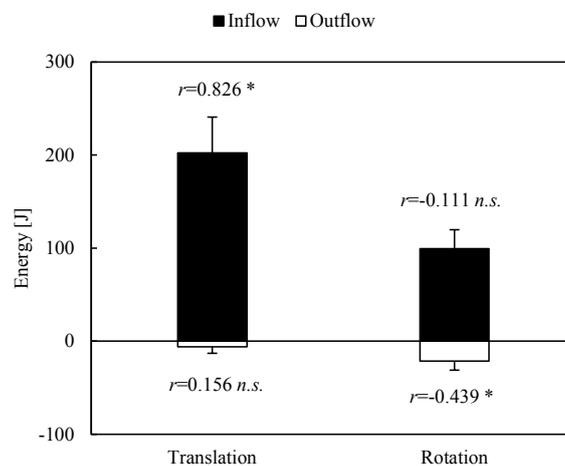


図2-8 グリップ力およびグリップトルクによってバットへ流入出した力学的エネルギー

*: インパクト時のバットヘッドスピードとの有意な相関関係を意味する($p<0.001$)

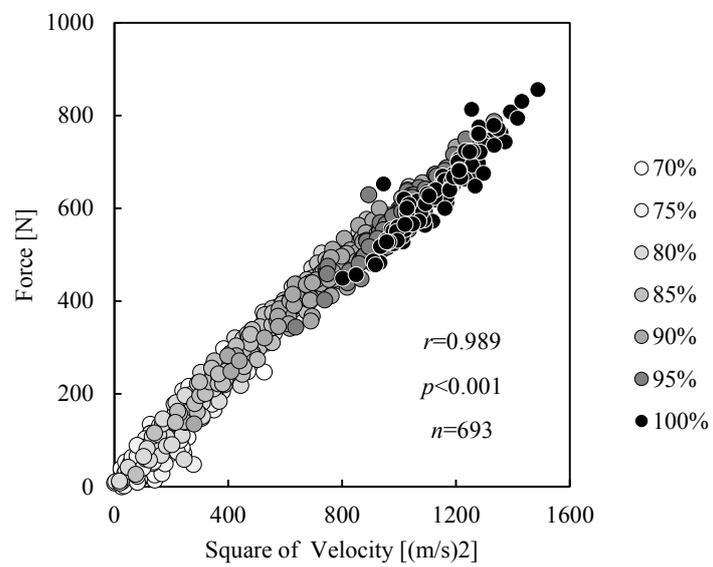


図2-9 バット長軸方向へのグリップ力とバットヘッドスピードの平方との関係

4. 考察

4.1. トスされたボールの位置およびスピード

ストライクゾーンの大きさを考慮すると、インパクト時における打者の身体重心に対するトスされたボール位置の標準偏差は小さく、ボールスピードの標準偏差は 1 m/s 未満であった。加えて、本論文では打者の納得いく試技を分析対象としている。これらのことから、本論文のデータ収集におけるトスされたボールのばらつきは、打者のバッティング動作を著しく変化させるものではなかったと考えられる。そのため、後述する章では、トスされたボールの位置およびスピードのばらつきについての検討は省略する。

4.2. バットのダイナミクス

X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは、規格化時間 50%以降において正の値を示し、規格化時間 75-80%でピークに達していた。その後、 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは規格化時間 80%以降において減衰傾向を示した(図 2-6 右上段)。グリップトルクによるバットの回転パワーは、 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクと類似した変化を示した(図 2-7 上段)。これらのことから、グリップトルクによるバットの回転パワーは、 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクに強く依存すると考えられる。また、バットスイングの中盤からインパクト直前までの局面(規格化時間 50-90%)において、グリップトルクによってバットへ回転の運動エネルギーが流入することが、バットの回転速度の増大に貢献していると推察される。しかしながら、グリップトルクおよびバットの回転パワーは、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった(図 2-6 下段, 2-7 下段)。森下ほか(2015)は、順動力学演算を用いてバットヘッドスピードに対するグリップ力およびグリップトルクの貢献度について検討し、グリップトルクが生成するインパクト時のバットヘッドスピードは概ね 30%程度のみであることを報告している。そのため、インパクト時のバットヘッドスピードに対するグリップトルクの貢献度は大きくないことが推察され、両変数間における相関関係も強くなかったと考えられる。

X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは、規格化時間 80%以降において減衰傾向を示し、インパクト時では負の値に転じていた(図 2-6 右上段)。女子ソフトボールのバッティング動作について分析し

た先行研究においても、インパクト直前でのバットグリップに対して発揮されるトルクが急激に減少することが報告されている (Milanovich and Nesbit, 2014). 加えて、バットヘッドスピードの急激な増大によって、グリップトルクが減衰すると考察されている. 本章の結果においても、バットは高速で回転しており、インパクト直前におけるバットの角速度は 2000 deg/s を超えている. 骨格筋における力-速度関係に基づくと (Hill, 1938), 仮にバットの回転速度で手関節が回転したとしても、各手関節によって発揮されるトルクは小さくなる. そのため、規格化時間 80%以降の X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクの減衰は、両手関節周辺の骨格筋における生理学的限界によるものであると考えられる. また、インパクト時において、 X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクは負の値に転じており、このトルクの発揮はバットの減速させる作用に働く. サッカーのインステップキックにおいても、ボールインパクト直前の局面での膝関節では屈曲トルクが発揮されることが報告されており (布目, 2011), 本章における結果と類似している. 布目 (2011) は、ヒトの筋力発揮には速度依存性があり、高速で回転する下腿部に対して膝関節周辺の筋群が伸張され、抵抗となることで膝関節の Safety 機構としての役割を果たしていると考察している. つまり、サッカーのインステップキックにおけるインパクト直前の膝関節屈曲トルクは、膝関節屈曲筋が積極的に張力を発揮することで生じるのではなく、引き伸ばされる際の抵抗が屈曲モーメントとして計算された結果であると推察されている. インパクト時にみられた X_{bat} 軸周りにおけるグリップトルクの負の値についても、サッカーのインステップキックにおける膝関節の屈曲トルクの発揮と同様に、手関節周辺筋群が伸張される際の抵抗が負のトルクとして評価されたものであると考えられる.

規格化時間 45%以降、 Y_{bat} 軸周りにおける負のグリップトルクが発揮されていた (図 2-6 右上段). このトルクの発揮は、バットヘッドの下降を防ぐことで、バットを適切な角度に維持するためのものであると考えられる. 女子ソフトボールのバッティング動作について分析した先行研究においても、同様の結果が報告されている (Milanovich and Nesbit, 2014).

規格化時間 55%以降において、 Z_{bat} 軸方向への正のグリップ力が増大していた (図 2-6 左上段). 一般に、回転する物体に作用する向心力 (あるいは遠心力) は回転半径に反比例するため、その物体の加速度もまた回転半径に反比例する. 加えて、向心力は回転する物体の移動速度の

平方に比例する。規格化時間 70-100%において、 Z_{bat} 軸方向への正のグリップ力とバットヘッドスピードの平方は比例関係にあった(図 2-9)。しかしながら、バットヘッドの加速度の変化にもかかわらず、バットヘッドの曲率半径は単調増加していた。ハンマー投げに関する先行研究からは、ハンマーヘッドの加速度が増大する局面ではハンマーヘッドの曲率半径は短縮することが報告されている(Dapena and Feltner, 1989; 坂東ほか, 2006)。したがって、回転動作という観点において類似する野球のバッティングとハンマー投げは、異なる加速メカニズムであることが示唆される。加えて、 Z_{bat} 軸方向への正のグリップ力は、バットヘッドの曲率半径を短縮させるほどの大きさではなく、バットの遠心力に対してある割合で抗する程度に発揮されているといえる。

規格化時間 75%以降、グリップ力によるバットの並進パワーは急激に増大し、インパクトまで正の値を示した(図 2-7 上段)。加えて、インパクト直前において、グリップ力によるバットの並進パワーは、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係を示した(図 2-7 下段)。この結果は、グリップ力によるバットの並進パワーの発揮がバットヘッドスピードの増大に貢献することを示唆するものである。グリップ力によるバットの並進パワーは、グリップ力とグリップ速度の内積で表される。上述した先行研究において(森下ほか, 2015)、グリップに作用するバット長軸方向への力は、インパクト時のバットヘッドスピードの概ね 70%を生成することが報告されている。しかしながら、本章における結果から、バット長軸(Z_{bat} 軸)方向へのグリップ力はバットの遠心力に抗する程度にのみ発揮されることが示唆されている(図 2-5 右, 図 2-9)。そのため、グリップ力によるバットの並進パワーの大きさは、バットのグリップ速度に依存すると考えられる。特に、野球のバッティング動作においては、グリップ力のほとんどが Z_{bat} 軸方向へのグリップ力であったことから、グリップ力によるバットの並進パワーは Z_{bat} 軸方向へのバットのグリップ速度に強く依存することが予想される。ゴルフのドライバーショットにおいて、Miura(2001)は、回転軸が固定されていないモデルによるエミュレーションを用いてパラメトリック励振に類似したパラメトリック加速のメカニズムについて検討している。その結果、回転軸が遠心力とは反対方向へ移動すると、クラブの運動エネルギーが増大することが示された。さらに、運動エネルギーの増加は向心力と回転軸の速度との交互作用の結果であり、モデルのパワー回転軸の移動速度に依存することが報告されている。また、Miura(2001)は、この加速メ

カニズムはテニスや野球、ホッケーなどの他のスポーツにも適用されていることを予測している。本章もまた、グリップ力によるバットの並進パワーがグリップ速度に依存することを示唆しており、上述した先行研究が示唆する内容を具体的に支持する例であるといえる。

バットへ流入出した力学的エネルギーをみると(図 2-8), グリップ力によってバットへ流入した力学的エネルギーは、グリップトルクによって流入した力学的エネルギーの概ね 2 倍の大きさであり、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた。この結果は、グリップ力によってバットへ流入する力学的エネルギーがインパクト時のバットヘッドスピードの大きさに及ぼす影響が大きいことを示唆している。加えて、グリップトルクによってバットへ流入した力学的エネルギーとインパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な正の相関関係が認められなかったことから、バットヘッドスピードの大きさに関わらず、グリップトルクによってバットへ流入する力学的エネルギーの大きさに差異はないことが推察される。また、バットへ力学的エネルギーが流入出する時系列的様相について考察すると(図 2-7), スイング中盤まではバットへの力学的エネルギーの流入は概ねなく、スイング中盤からインパクト直前の局面においてグリップトルクによってバットへ回転の運動エネルギーが流入していた。そして、規格化時間 80%付近からバットへの回転エネルギーの流入は減衰していたが、同時期においてグリップ力によるバットへ並進の運動エネルギーの流入が急増していたことが観察できる。これらのことから、野球のバッティングにおいて、打者は異なるタイミングで並進および回転の運動エネルギーをバットへ流入させることによってバットヘッドスピードを増大させていると考えられる。

5. 概括

本章では、野球のバッティングにおいて、バットスイング局面(バットヘッドスピードが 1 m/s 以上に達した時点からインパクトした時点)に着目して、バットヘッドスピードを増大させるためのメカニズムを運動学および力学的観点から検討し、以下のことが明らかになった。

1. バットスイング中盤からインパクト直前の局面(規格化時間 50-90%)において、スイング平面に対して垂直な軸周りのトルクをバットグリップに発揮することで回転の運動エネルギーがバットへ流入していた。
2. バットスイング後半からインパクトまでの局面(規格化時間 70-100%)において、バット長軸方向への力をバットグリップに発揮することで並進の運動エネルギーがバットへ流入しており、バットへ流入した並進の運動エネルギーとインパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な正の相関関係が認められた。
3. バットの長軸方向へ発揮される力はバットの遠心力に抗する程度に発揮されていた。

これらのことから、打者は、バットスイング中盤からインパクト直前までの局面では回転の運動エネルギーを、バットスイング後半からインパクトまでの局面では並進の運動エネルギーをバットへ流入させ、バットの力学的エネルギーを増大せることによってバットヘッドスピードを増大させていることが推察された。

第3章 下肢および体幹における力学的エネルギーの流れ

1. 目的

本章の目的は、野球のバッティング動作における力学的エネルギーの流れおよびその発生・吸収を下肢および体幹に着目して定量化すること。

2. 方法

2.1. データ収集

分析対象者は硬式野球部に所属する男子大学選手および男子社会人選手 79 名であった(身長:173.0±5.6 cm, 体重:71.4±7.4 kg, 年齢:19.8±1.3 yrs). それぞれ, 右打ち 41 名, 左打ち 38 名であった.

第2章の 2.2. データ収集と同様に, バット(3 点), 分析対象者の身体特徴点(38 点)およびボール(6 点)に再帰反射マーカーまたはそのテープを貼付し(図 2-1), 最大努力によるトスバッティングを行わせた. トスバッティング中の再帰反射マーカーの軌跡をサンプリング周波数 250 Hz でモーションキャプチャーシステム(Vicon MX, Vicon Motion Systems)を用いて記録した. 同時に, トスバッティング中に両足に作用する地面反力をサンプリング周波数 1000Hz で 2 台のフォースプレート(9281B, Kistler)を用いてそれぞれ測定した. なお, 左打ちの分析対象者に関しては, データ処理の前に左右を反転させ, 右打ちの打者として後述するデータ処理を行った.

2.2. データ処理

2.2.1. 分析範囲

投手側の足部が接地した時点をストライド足接地(SFC), 後述する下胴部セグメントの回旋角速度が最大に達した時点を最大回旋速度(MRV), バットヘッドの加速度が負に転じた時点をインパクト(IMP)と定義した(図 3-1). そして, SFC から IMP を 100%として時間を規格化した. なお, MRV の全試技の平均時刻が 65.9%であったため, MRV を 66%として規格化した.

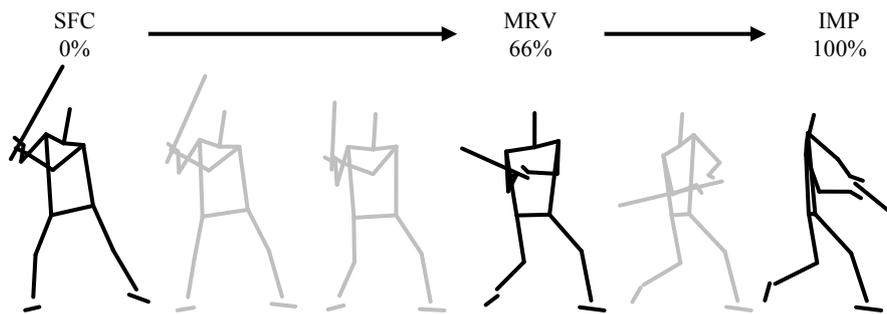


図3-1 分析範囲

2.2.2. 平滑化

再帰反射マーカーの3次元座標データは Butterworth 型ローパスデジタルフィルターによって平滑化され、カットオフ周波数(14-21 Hz)は Yu et al. (1999)の方法を用いて決定された。なお、バットとボールがインパクトした際のバットヘッドの急激な減速を考慮して、バットヘッドの先端部および縁部の座標データについては平滑化を行わなかった。

2.2.3. 慣性パラメーター

各セグメントの慣性パラメーターを阿江ほか(1992)の身体部分慣性係数を用いて算出した。バットの重心は測定され、バットヘッドからバットグリップを結んだ線分の 33.3%の位置であった。バットの慣性モーメントは、バットのグリップを支点とした振り子運動の周期から算出された。

2.2.4. セグメント座標系

足部、下腿部、大腿部、下胴部、上胴部を剛体リンクでモデル化した(図 3-2a)。なお、本研究では、体幹部を剣状突起で上下に分割し、上半分を上胴部、下半分を下胴部と呼称する。足関節および膝関節の中心は各関節の周囲に貼付した 2 点のマーカーの midpoint とし、股関節中心は倉林ほか(2003)が定義した推定方法を用いて算出された。体幹関節中心(上胴部と下胴部の間の仮想的連結部)は剣状突起に貼付したマーカー位置として定義した。

足部において、踵骨から第1中足骨と第5中足骨の midpoint へ向かう単位ベクトルを Y_f とし、第1中足骨から第5中足骨へ向かうベクトル(投手側の足部の場合は第5中足骨から第1中足骨へ向かうベクトル)を補助ベクトル S_f とした。さらに、 S_f と Y_f の外積によって得られた単位ベクトルを Z_f とし、 Y_f と Z_f の外積によって得られる単位ベクトルを X_f とした。そして、 X_f, Y_f, Z_f を軸とする座標系を足部座標系として定義した。

下腿部において、内果と外果の midpoint から大腿骨内側顆と大腿骨外側顆の midpoint へ向かう単位ベクトルを Z_s とし、内果から外果へ向かうベクトル(投手側の下腿部の場合は外果から内果へ向かうベクトル)を補助ベクトル S_s とした。さらに、 Z_s と S_s の外積によって得られた単位ベクトルを Y_s とし、 Y_s と Z_s の外積によって得られる単位ベクトルを X_s とした。そして、 X_s, Y_s, Z_s を軸とする座標系を下腿部座標系として定義した。

大腿部において、大腿骨内側顆と大腿骨外側顆の midpoint から股関節中心へ向かう単位ベクトルを Z_t とし、大腿骨内側顆から大腿骨外側顆へ向かうベクトル(投手側の大腿部の場合は大腿骨外側顆から大腿骨内側顆へ向かうベクトル)を補助ベクトル S_t とした。さらに、 Z_t と S_t の外積によって得られた単位ベクトルを Y_t とし、 Y_t と Z_t の外積によって得られる単位ベクトルを X_t とした。そして、 X_t, Y_t, Z_t を軸とする座標系を大腿部座標系として定義した。

下胴部において、左の上前腸骨棘から右の上前腸骨棘へ向かう単位ベクトルを X_{lt} とし、左右の上後腸骨棘の midpoint から左右の上前腸骨棘の midpoint へ向かうベクトルを補助ベクトル S_{lt} とした。さらに、 X_{lt} と S_{lt} の外積によって得られた単位ベクトルを Z_{lt} とし、 Z_{lt} と X_{lt} の外積によって得られる単位ベクトルを Y_{lt} とした。そして、 X_{lt}, Y_{lt}, Z_{lt} を軸とする座標系を下胴部座標系として定義した。

上胴部において、剣状突起から胸骨上縁へ向かう単位ベクトルを Z_{ut} とし、第7頸椎から胸骨上縁へ向かうベクトルを補助ベクトル S_{ut} とした。さらに、 S_{ut} と Z_{ut} の外積によって得られる単位ベクトルを X_{ut} とし、 Z_{ut} と X_{ut} の外積によって得られる単位ベクトルを Y_{ut} とした。そして、 X_{ut}, Y_{ut}, Z_{ut} を軸とする座標系を上胴部座標系として定義した。

バットにおいて、バットヘッドの先端部からバットグリップへ向かう単位ベクトルを Z_b とし、バットヘッドの先端部からバットヘッドの縁部へ向かうベクトルを補助ベクトル S_b とした。さらに、 Z_b と S_b の外

積によって得られた単位ベクトルを Y_b とし、 Y_b と Z_b の外積によって得られる単位ベクトルを X_b とした。そして、 X_b, Y_b, Z_b を軸とする座標系をバット座標系として定義した。

なお、各セグメントに設定した座標系の原点は各セグメントの重心とし、各セグメントに設定した座標系から各セグメントの角速度を算出した(和達, 1983)。

2.2.5. 関節座標系

各軸が規格化・直交化された右手座標系を設定し(図 3-2b), 算出した関節角速度や関節トルクを各軸に投影することで各軸周りの関節角速度や関節トルクとした。

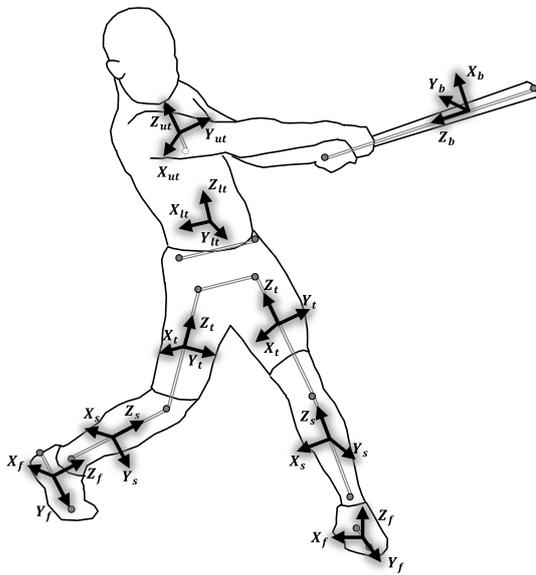
足関節において、足部に設定した Y_f を Y_a とし、 Y_a と下腿部に設定した Z_s の外積によって得られる単位ベクトルを X_a とした。さらに、 X_a と Y_a の外積によって得られる単位ベクトルを Z_a とした。そして、 X_a, Y_a, Z_a を軸とする座標系を足関節座標系と定義した。

膝関節において、下腿部に設定した Z_s を Z_k とし、 Z_k と大腿部に設定した Z_t の外積によって得られる単位ベクトルを X_k とした。さらに、 Z_k と X_k の外積によって得られる単位ベクトルを Y_k とした。そして、 X_k, Y_k, Z_k を軸とする座標系を膝関節座標系と定義した。

股関節において、大腿部に設定した Z_t を Z_h とし、 Z_h と左の股関節中心から右の股関節中心へ向かうベクトルの外積によって得られる単位ベクトルを Y_h とした。さらに、 Z_h と Y_h の外積によって得られる単位ベクトルを X_h とした。そして、 X_h, Y_h, Z_h を軸とする座標系を股関節座標系と定義した。

体幹関節においては、上胸部に設定したセグメント座標系 X_{ut}, Y_{ut}, Z_{ut} を体幹関節座標系 $X_{trs}, Y_{trs}, Z_{trs}$ として用いた。

(a) Segment coordinate system



(b) Joint coordinate system

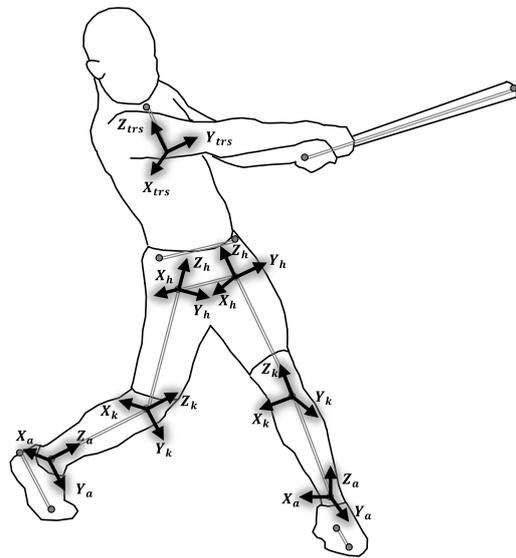


図3-2 セグメントおよび関節に定義した局所座標系

2.3. 算出項目

2.3.1. セグメントの力学的エネルギー

セグメントの力学的エネルギー (E_i) を以下の式より算出した.

$$E_i = m_i g h_i + \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2$$

ここで, m_i はセグメントの質量, g は重力加速度, h_i はセグメントの質量中心の高さ, v_i はセグメント質量中心の速度, I_i はセグメントの慣性モーメント, ω_i はセグメントの角速度である.

2.3.2. 関節力, 関節トルク, セグメントトルクによるパワー

逆動力学法 (Winter, 2009) を用いて各関節に作用する正味の力およびトルクを算出した. そして, 先に定義した各関節座標系に投影することで各軸方向の関節力および各軸周りの関節トルクを算出した. そして, 関節力によるパワー (JFP) およびセグメントトルクによるパワー (STP) を以下の式より算出した.

$$JFP = \mathbf{F}_j \cdot \mathbf{v}_j$$

$$STP = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_i$$

ここで, \mathbf{F}_j はセグメントに作用する関節力, \mathbf{T}_j はセグメントに作用する関節トルク, \mathbf{v}_j は関節速度, $\boldsymbol{\omega}_i$ はセグメントの角速度である.

また, 関節トルクパワーを (JTP) を以下の式より算出した.

$$JTP = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_j$$

ここで, $\boldsymbol{\omega}_j$ は関節の角速度であり, 遠位セグメントの角速度から近位セグメントの角速度を減じたものである.

関節力パワーおよびセグメントトルクパワーを, 先に定義した局面ごとに実時間で積分することで力学的仕事を算出し, セグメント間を関節力あるいは関節トルクに起因して流入出する力学的エネルギーの指標とした. 同様に, 関節トルクパワーを局面ごとに時間積分することで力学的仕事を算出し, 関節トルクによって発生・吸収される力学的エネルギーの指標とした (Gordon et al., 1980).

2.4. 統計分析

関節力, 関節トルク, セグメントトルクによるパワーを局面ごとに時間積分することによって力学的仕事と IMP におけるバットヘッドスピードの Pearson の積率相関係数を算出した(有意水準:1%).

3. 結 果

3.1. セグメントの力学的エネルギーの変化

図 3-3 は体重あたりにおける左右の下肢および体幹, バットの力学的エネルギーの時系列変化を示したものである。

投手側の大腿部の力学的エネルギーは SFC から MRV にかけて概ね一定だったが, MRV から IMP にかけて微減した。投手側の下腿部および足部の力学的エネルギーは分析範囲を通じて概ね一定の値を示し, 足部はほぼゼロだった(図 3-3a)。捕手側の大腿部の力学的エネルギーは SFC から MRV にかけて微増し, MRV から IMP にかけて微減を示した。捕手側の下腿部および足部の力学的エネルギーは, 投手側の下腿部および足部と同様に, 分析範囲を通じて概ね一定の値を示し, 足部はほぼゼロだった(図 3-3b)。上胴部および下胴部の力学的エネルギーは分析範囲を通じて概ね一定の値を示した。バットの力学的エネルギーは MRV 付近から漸増した(図 3-3c)。

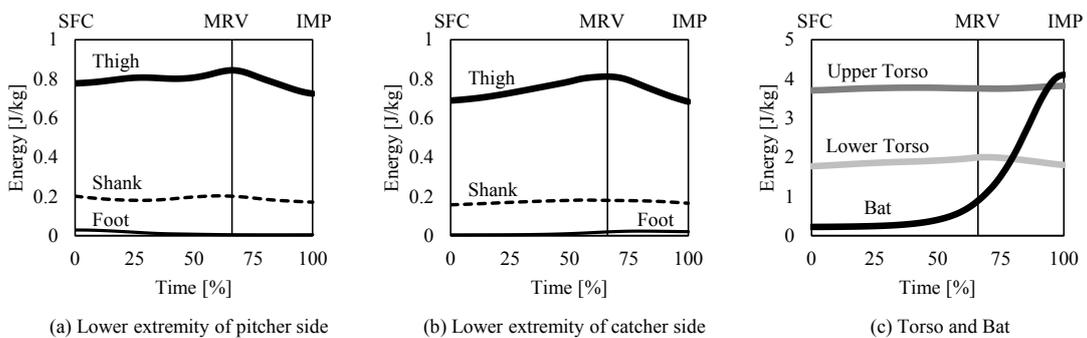


図3-3 下肢(左:投手側, 中:捕手側)および体幹, バット(右)の力学的エネルギーの変化

3.3. 力学的エネルギーの流れ

図 3-4 は各セグメントの近位および遠位の関節に作用する関節力および関節トルクによるパワーの平均の時系列変化を示している。これらのパワーを先に定義した局面ごとに実時間で積分することで正味の力学的仕事を算出し、セグメント間を関節力あるいは関節トルクに起因して流入出する力学的エネルギーの指標とした。

図 3-5 は関節力および関節トルクに起因して左右の足部、下腿部、大腿部、下胴部を流入出する体重あたりの力学的エネルギーを局面ごとに示したものである。直線状の矢印は関節力、円弧状の矢印は関節トルクに起因する力学的エネルギーの流れである。これらは 0.1 J/kg から 1.5 J/kg 以上を 4 段階に分けられ、それぞれの流れの方向および大きさを表している。なお、0.1 J/kg 未満の力学的エネルギーの流れについては表記を省略している。IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められた力学的エネルギーの流れに対して、その相関係数をそれぞれ付記した。また、バットに付記した白抜き矢印は、各局面におけるバットの力学的エネルギーの変化量であり、体重あたりの大きさに規格化されていない。IMP におけるバットヘッドスピードとの相関係数および変化量の平均値(±標準偏差)をそれぞれ示した。下胴部加速局面において、左右の股関節で関節トルクによって力学的エネルギーが下胴部へ流入していた。さらに、体幹関節で関節トルクによって力学的エネルギーが下胴部から上胴部へ流出していた。また、IMP におけるバットヘッドスピードと捕手側の膝関節トルクによって大腿部へ流入、体幹関節力によって下胴部へ流入した力学的エネルギーにそれぞれ有意な相関関係が認められた($r=0.294, p<0.01$; $r=0.303, p<0.01$)。バットの力学的エネルギーの変化量は正を示したが(54.6 ± 31.6 J), IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった($r=-0.066, n.s.$) (図 3-5a)。スイング局面において、体幹関節で関節トルクによって力学的エネルギーが上胴部へ流入していた。また、バットの力学的エネルギーの変化量が増大し(222.5 ± 43.7 J), IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められた($r=0.691, p<0.01$)。IMP におけるバットヘッドスピードと捕手側の膝関節トルクによって下腿部へ流入、捕手側の股関節トルクによって下胴部へ流入した力学的エネルギーにそれぞれ有意な相関関係が認められた($r=0.369, p<0.01$; $r=0.304, p<0.01$) (図 3-5b)。

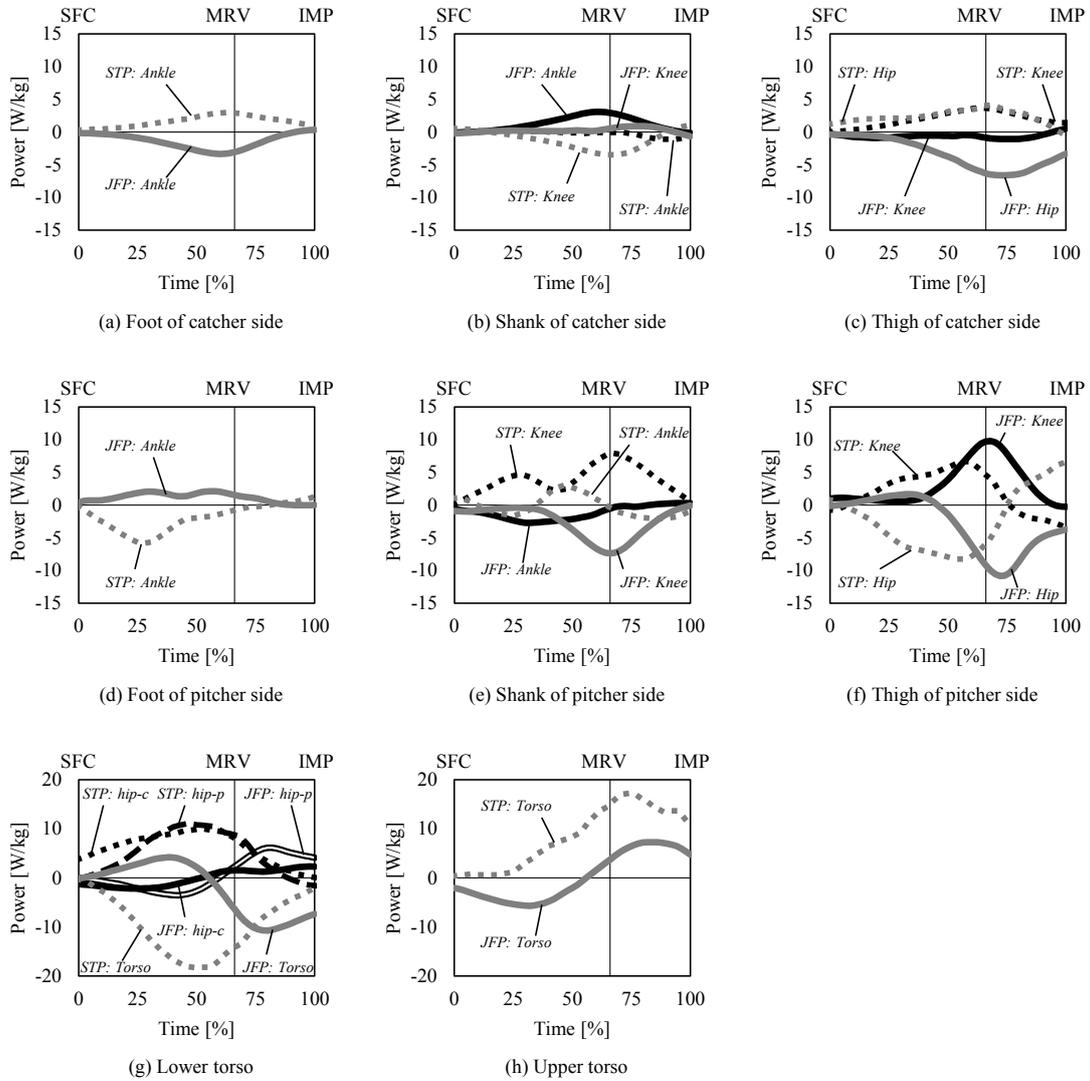


図3-4 セグメントに作用するパワーの平均の変化パターン

JFP: 関節力によるパワー, STP: セグメントトルクによるパワー

下腕部に作用するパワー(g)のhipに付記したcおよびpは、捕手側(Catcher)および投手側(Pitcher)の股関節をそれぞれ意味している

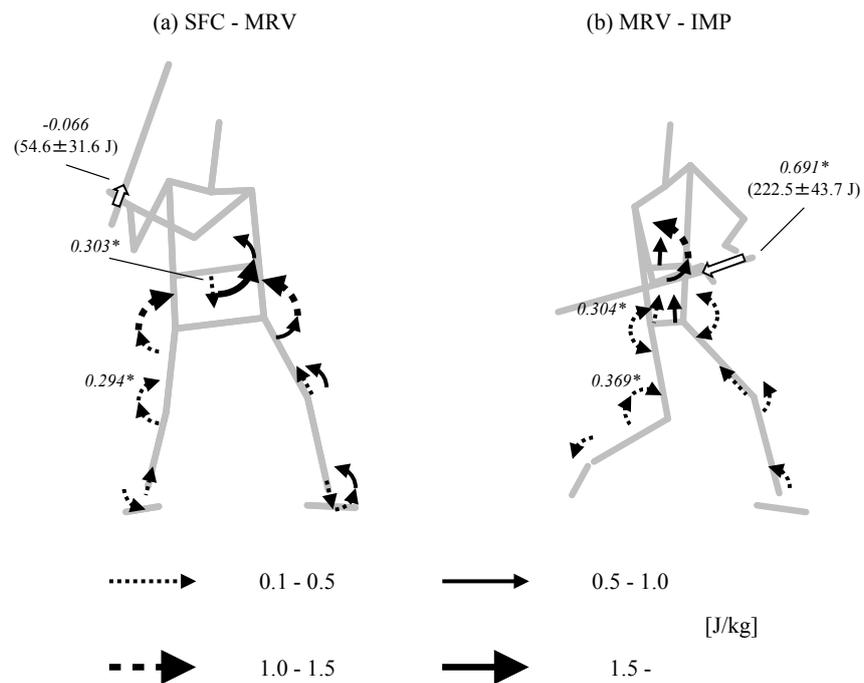


図3-5 下肢および体幹の力学的エネルギーの流れ
 *: インパクト時のバットヘッドスピードとの相関係数 ($p < 0.01$)

左右の下肢および体幹に付記した直線状の矢印は関節力、円弧状の矢印は関節トルクに起因した各局面における正味の力学的エネルギーの流れ、バットに付記した白抜き矢印は各局面におけるバットの力学的エネルギーの変化量をそれぞれ意味している

3.4. 力学的エネルギーの発生・吸収

図 3-6 は左右の下肢関節トルクおよび体幹関節トルクによるパワーの平均の時系列変化を示している。これらのパワーを先に定義した局面ごとに実時間で積分することで力学的仕事を算出し、左右の下肢関節および体幹関節で発生あるいは吸収された力学的エネルギーの指標とした。

図 3-7 は関節トルクによって発生・吸収された体重あたりの力学的エネルギーの平均値(±標準偏差)を局面ごとに示したものである。下胴部加速局面において、捕手側の股関節では力学的エネルギーの発生が顕著に大きかった。投手側の股関節では力学的エネルギーの発生・吸収がみられたが、発生の方が大きかった。体幹関節でも力学的エネルギーの発生・吸収がみられたが、吸収の方が大きかった(図 3-7a)。スイング局面において、体幹関節では力学的エネルギーの発生が大きかった。投手側の股関節では、下胴部加速局面と同様に、力学的エネルギーの発生・吸収がみられ、発生の方が大きかった(図 3-7b)。しかしながら、いずれの力学的エネルギーの発生・吸収についても、IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。

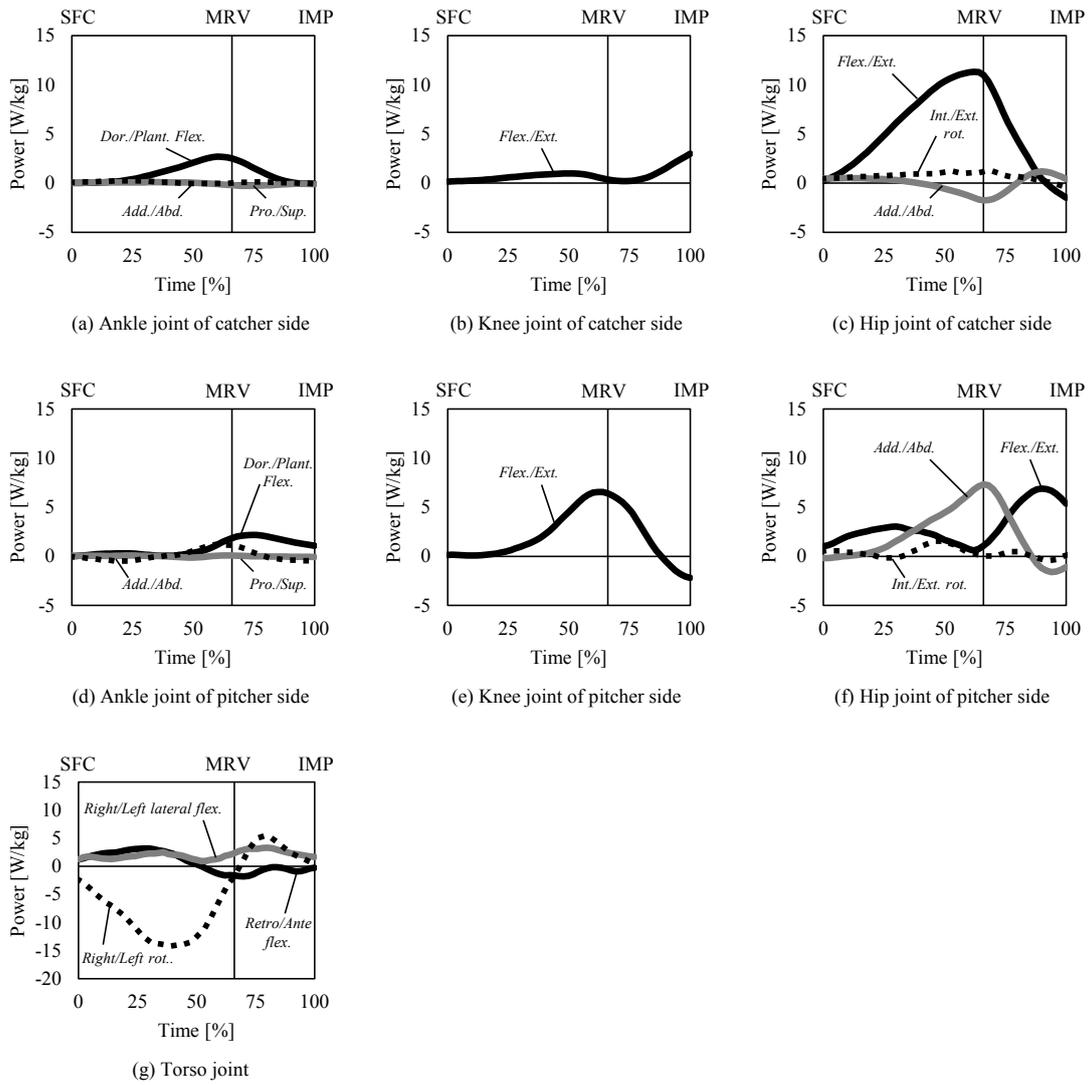


図3-6 下肢および体幹関節トルクによるパワーの平均の変化

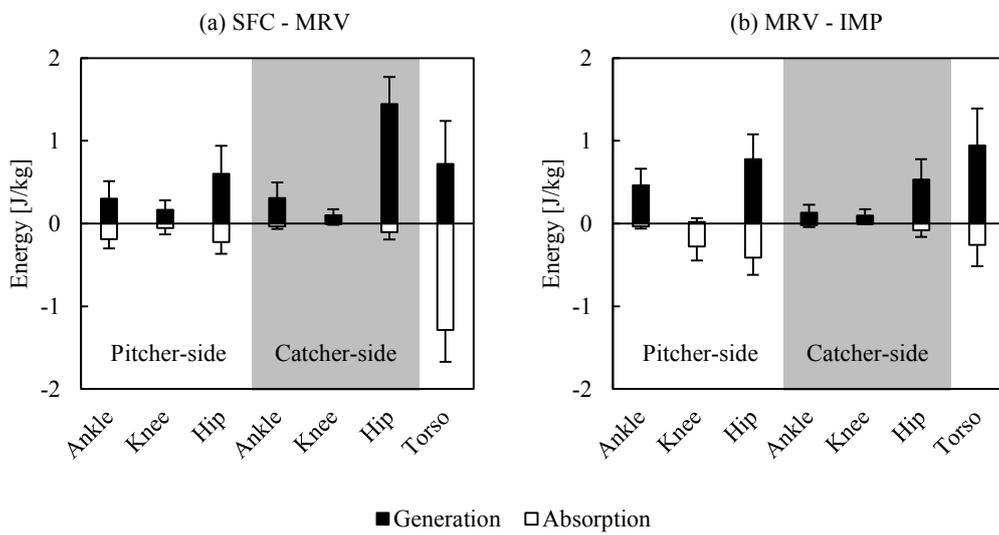


図3-7 下肢関節および体幹関節における力学的エネルギーの発生・吸収

4. 考察

4.1. 力学的エネルギーの流れおよび発生・吸収

SFC-MRV において、捕手側の股関節では顕著な力学的エネルギーの発生がみられた(図 3-7a). Shaffer et al.(1993)は、投手側の踵部の接地からスイング中盤にかけて捕手側の大臀筋の活動レベルが高いことを報告し、パワーの発揮に貢献すると考察している。本章の結果は、この先行研究の考察を具体的に支持するものであるといえる。同様に、投手側の股関節においても力学的エネルギーの発生がみられた。これらのことより、野球のバッティングにおいて、左右の股関節は力学的エネルギーの発生源としての役割を果たしていると考えられる。

また、体幹関節では力学的エネルギーの吸収が大きかった(図 3-7a)。野球のバッティング動作では SFC 付近から体幹は捻転され(田子ほか, 2006a, b; 田内ほか, 2005; Welch et al., 1995), この捻転に抗するトルクが体幹関節では発揮されている(高木ほか, 2010)。これらのことより、野球のバッティングでは、下胴部加速局面において体幹関節周辺の筋群は伸張性収縮となり、体幹関節において力学的エネルギーが吸収されると考えられる。

同局面において、左右の股関節トルクによる下胴部への力学的エネルギーの流入、体幹関節トルクによる下胴部から上胴部への力学的エネルギーの流出がみられた(図 3-5b)。これらの流れは他の力学的エネルギーの流れと比べて大きかった。しかし、上胴部および下胴部へ大きな力学的エネルギーが流入したにもかかわらず、それらの力学的エネルギーに顕著な増大は見られなかった(図 3-3c)。阿江ほか(2015)は、本章の SFC から MRV にあたる局面において、野球のバッティングでは上胴部からグリップ側の上腕部へ大きな力学的エネルギーが流出することを報告している。以上より、野球のバッティングにおいて、SFC-MRV では、左右の股関節で生成された力学的エネルギーが関節トルクによって下胴部へ流入し、体幹で留まることなく上肢へ流出する局面であることが推察された。

MRV-IMP において、体幹関節では力学的エネルギーの発生が大きかった(図 3-7b)。加えて、同関節では関節トルクによって上胴部へ力学的エネルギーが流入していた(図 3-5b)。阿江ほか(2015)は、体幹関節トルクによって下胴部から上胴部へ顕著に力学的エネルギーが流出していた

ことを報告しており、本章の結果と類似した結果が示されている。また、上胴部へ大きな力学的エネルギーが流入したにもかかわらず、下胴部加速局面と同様に上胴部の力学的エネルギーに顕著な増大はみられなかったが、バットの力学的エネルギーは急激に増大していた(図 3-3c)。このバットの力学的エネルギーの変化量は、両手部からバットへ流入した力学的エネルギーであると考えることができる。これらのことから、野球のバッティングにおいて、スイング局面は、体幹関節で生成された力学的エネルギーが関節トルクによって上胴部へ流入し、上胴部で留まることなく上肢およびバットへ伝達される局面であることが推察された。

4.2. 力学的エネルギーとバットヘッドスピードの関係

分析範囲を通して、捕手側の膝関節トルクによって大腿部、股関節トルクによって下胴部へ流入した力学的エネルギーと IMP におけるバットヘッドスピードにそれぞれ有意な相関関係が認められた(図 3-5)。この結果は、捕手側の膝関節トルクおよび股関節トルクによって伝達された力学的エネルギーが大きいほど、IMP におけるバットヘッドスピードが大きかったことを意味している。脚から伝達される力学的エネルギーが増大することは、バットへ伝達させるための力学的エネルギーの絶対量を増大させることにつながる。そのため、IMP におけるバットヘッドスピードと捕手側の脚における力学的エネルギーの伝達量との間に有意な相関関係が認められたと考えられる。また、本章の結果は、捕手側の脚から伝達される力学的エネルギーが、IMP におけるバットヘッドスピードの大きさに差を生じさせることを示唆している。しかしながら、野球のバッティングにおいて、ストライド動作や体重移動などの投手側の脚についての指導は散見されるが、捕手側の脚についての指導は少ない(金堀ほか, 2012)。指導現場に対して有用な知見を提示するため、捕手側の脚における力学的エネルギーの流れを規定する力学的要因や動作についての検討が今後の研究課題であるといえる。

SFC-MRV における左右の股関節トルクによって下胴部へ流入、体幹関節トルクによって下胴部から上胴部へ流出、スイング局面における体幹関節によって上胴部へ流入した力学的エネルギーは大きかったが、IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった(図 3-5)。

同様に、下胴部加速局面における左右の股関節トルクによる正の力学的仕事およびスイング局面における体幹関節トルクによる正の力学的仕事も大きかったが、IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった(図3-5)。大きな力学的エネルギーの流れあるいは発生・吸収として、IMP におけるバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められたのは、スイング局面におけるバットの力学的エネルギーの変化量のみであった(図3-5b)。異なる打点高条件に対する野球のティーバッティングにおける体幹のキネティクスについて分析した研究では、体幹の左右回旋トルクによる正の力学的仕事が顕著に大きかったと報告されている(阿江ほか, 2015)。しかしながら、この体幹の左右回旋トルクによる正の力学的仕事は打点高間において顕著な差がみられなかったにもかかわらず、バットヘッドスピードは打点高が低いほど大きかった。このことから、体幹の左右回旋トルクによる正の力学的仕事がバットヘッドスピードの打点高間における差に及ぼす影響は小さく、下肢および体幹で生成された力学的エネルギーを左右の上肢を介してバットへ効率的に伝達することが打点高の違いによるバットヘッドスピードの差を生じさせる要因の1つであると考察されている。また、野球のティーバッティングにおける左右上肢のキネティクスについて分析した研究では、バットスイング中に左右の上肢関節トルクによって負の力学的仕事がなされることが報告されている(阿江ほか, 2014)。以上より、左右の股関節および体幹関節で生成した力学的エネルギーをバットへ伝達する過程において、左右の上肢で停滞あるいは吸収される力学的エネルギーを小さくし、より大きな力学的エネルギーをバットへ伝達させることがバットヘッドスピードの増大に貢献することが推察される。

5. 概括

本章では、野球のバッティング動作における力学的エネルギーの流れおよびその発生・吸収について下肢と体幹に着目して分析・検討し、以下のことが明らかになった。

1. 投手側の足部接地から骨盤回旋角速度が最大に達するまでの局面 (SFC-MRV) において、左右の股関節で大きな力学的エネルギーが発生していた。
2. SFC-MRV において、関節トルクによって左右の股関節から下胴部へ力学的エネルギーが流入、下胴部から体幹関節へ力学的エネルギーが流出していた。
3. 骨盤回旋角速度が最大に達してからインパクトするまでの局面 (MRV-IMP) において、体幹関節から上胴部へ大きな力学的エネルギーの流入していた。
4. MRV-IMP において、バットの力学的エネルギーが急増していた。
5. 分析範囲を通して、体幹関節における力学的エネルギーの正味の発生・吸収量は概ねゼロで、体幹部の力学的エネルギーの変化は小さかった。

これらのことから、野球のバッティングでは、左右の股関節で生成した力学的エネルギーを体幹・上肢を介してバットへ効率的に伝達させることでバットヘッドスピードを増大させていると考えられる。加えて、野球のバッティングにおいて、体幹は力学的エネルギーの伝達経路としての役割を果たしていることが推察された。

第4章 力学的エネルギーの生成に関連する股関節のダイナミクス

1. 目的

第3章の結果より、野球のバッティング動作では、左右の股関節が力学的エネルギーの発生源であることが示唆された。加えて、左右の股関節で生成された力学的エネルギーが体幹および上肢を介してバットへ伝達されることで、バットヘッドが加速することが推察された。力学的エネルギーの生成に関連する股関節のダイナミクスが明らかになれば、バッティング動作に関するコーチングや筋力トレーニングに対する示唆など、指導現場にとって有用な知見の獲得につながることを予想される。

そこで本章では、野球のバッティング動作中において力学的エネルギーの生成に関連する左右の股関節のダイナミクスを記述し、インパクト時のバットヘッドスピードとの関係について検討することを目的とした。

2. 方法

2.1. データ収集

分析対象者は硬式野球部に所属する高校および大学、社会人男子選手 98 名であった(身長: 172.6 ± 5.6 cm, 体重: 70.3 ± 8.1 kg, 年齢: 19.0 ± 1.9 years)。それぞれ、右打ち 55 名、左打ち 43 名であった。

第2章の2.2. データ収集と同様に、バット(3点)、分析対象者の身体特徴点(38点)およびボール(6点)に再帰反射マーカ―またはそのテープを貼付し(図 2-1)、最大努力によるトスバッティングを行わせた。トスバッティング中の再帰反射マーカ―の軌跡をサンプリング周波数 250 Hz でモーションキャプチャーシステム(Vicon MX, Vicon Motion Systems)を用いて記録した。同時に、トスバッティング中に両足に作用する地面反力をサンプリング周波数 1000 Hz で 2 台のフォースプレート(9281B, Kistler)を用いてそれぞれ測定した。なお、左打ちの分析対象者に関しては、データ処理の前に左右を反転させ、右打ちの打者として後述するデータ処理を行った。

2.2. データ処理

2.2.1. 分析範囲

第 3 章の 2.2.1. 分析範囲と同様に、投手側の足部が接地した時点をストック足接地 (SFC)、後述する下胴部セグメントの回旋角速度が最大に達した時点をも最大回旋速度 (MRV)、バットヘッドの加速度が負に転じた時点を入力 (IMP) と定義した (図 3-1)。そして、SFC から IMP を 100%、MRV を 66% として時間を規格化した。

2.2.2. 平滑化

第 3 章の 2.2.2. 平滑化と同様に、再帰反射マーカーの 3 次元座標データは Butterworth 型ローパスデジタルフィルターによって平滑化され、カットオフ周波数 (14-21 Hz) は Yu et al. (1999) の方法を用いて決定された。

2.2.3. セグメント座標系

第 3 章の 2.2.4. セグメント座標系と同様に、左右の足部、下腿部、大腿部および下胴部を剛体リンクでモデル化し、各セグメントに各軸が規格・直交化された右手系の移動座標系を設定した (図 3-2a)。

2.2.4. 関節座標系

第 3 章の 2.2.5. 関節座標系と同様に、各関節に各軸が規格化・直交化された右手座標系を設定し、算出した関節トルクや関節角速度を各軸に投影することで各軸周りの関節トルクや関節角速度とした (図 3-2b)。

2.3. 算出項目

2.3.1. 関節角度

下胴部座標系に対する左右の大腿部座標系の相対的なオイラー角を股関節角度とした。 X_{it} と

X_t , Y_{lt} と Y_t , Z_{lt} と Z_t がそれぞれ一致する姿勢を基準姿勢とし、回転順序は X_t 軸→ Y_t 軸→ Z_t 軸の順とした。そして、符号を適宜反転することで回転順に屈曲(+) \cdot 伸展(-), 内転(+) \cdot 外転(-), 内旋(+) \cdot 外旋(-)と定義した。

2.3.2. 関節トルク

逆動力学演算を行い、各関節が発揮する正味のトルクを算出した。そして、算出した関節トルクを関節に定義した移動座標系の各軸に投影することで、各関節軸周りの関節トルクを算出した (Winter, 2009)。なお、身体各部の重心と慣性パラメーターは、阿江(1992)の身体部分慣性係数を用いて、平滑化された身体各部の座標データおよび被験者の体重から算出された。

2.3.3. 関節角速度

関節の角速度は、遠位部の角速度から近位部の角速度を減じた値として算出した。そして、算出した関節角速度を関節に定義した移動座標系の各軸に投影することで、各関節軸周りの関節角速度を算出した。

2.3.4. 関節トルクパワー

関節トルクパワーは、関節トルクと関節角速度を乗じた値として算出した。また、関節トルクに起因した力学的エネルギーの発生・吸収は、関節トルクパワーを実時間で積分することで力学的仕事として算出した (Gordon et al., 1980)。

2.4. 統計分析

IMPにおけるバットヘッドスピードと股関節角度および股関節で生成された力学的エネルギーの相関係数を算出した。時系列データについては、規格化時間毎に相関係数を算出した。

3. 結果

3.1. 関節角度

図 4-1 は、投手側の股関節角度の時系列変化について全被験者の平均値を示したものである。屈曲伸展角度は(図 4-1a), SFC では 30 deg 程度屈曲位であり, SFC から MRV 付近まで屈曲, その後 IMP まで伸展していた。内外転角度は(図 4-1b), SFC では 30 deg 程度外転位であり, SFC から IMP まで概ね内転していた。内外旋角度は(図 4-1c), SFC では内外旋角度 0 deg 程度であり, SFC から MRV 付近まで変化は小さく, MRV から IMP にかけて僅かに内旋していた。また, いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。

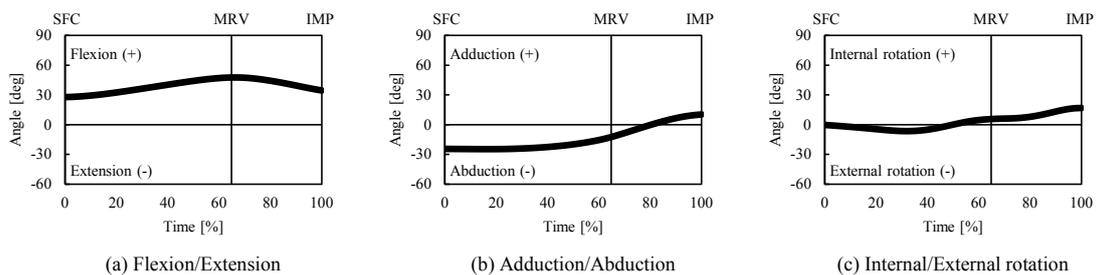


図4-1 投手側の股関節における角度の時系列変化

図 4-2 は、捕手側の股関節角度の時系列変化について全被験者の平均値を示したものである。屈曲伸展角度は(図 4-2a), SFC では 50 deg 程度屈曲位であり, SFC から IMP まで概ね伸展していた。内外転角度は(図 4-2b), SFC では内外転角度は 0 deg 程度であり, SFC から 80%付近まで外転, その後 IMP まで内転していた。内外旋角度は(図 4-2c), SFC では 20 deg 程度内旋位であり, SFC から IMP まで外旋していた。また, いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。

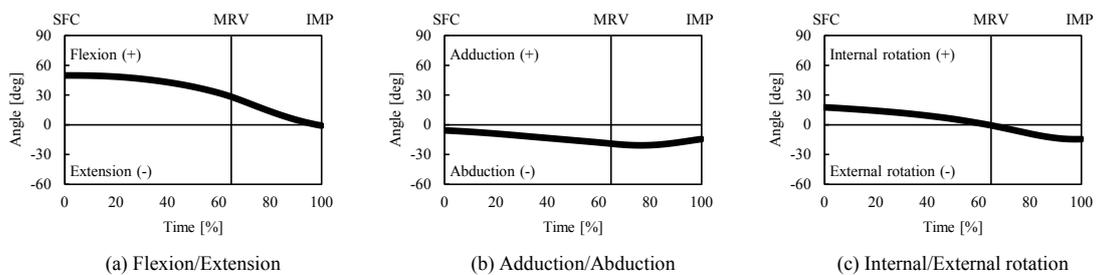
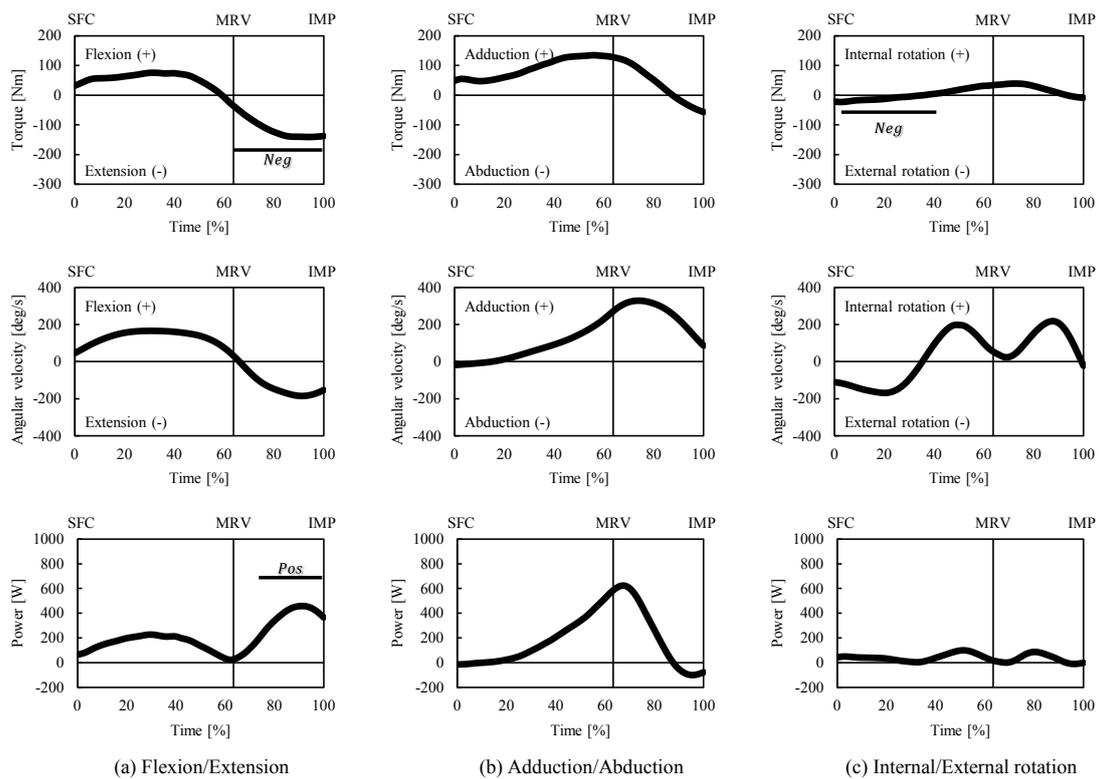


図4-2 捕手側の股関節における角度の時系列変化

3.2. 投手側の股関節における関節トルク, 関節角速度, 関節トルクパワー

図 4-3 は, 投手側の股関節トルク, 股関節角速度および股関節トルクパワーの時系列変化について全被験者の平均値を示したものである。屈曲伸展軸において(図 4-3a), 関節トルクは, SFC から MRV 付近にかけて屈曲トルク, MRV 付近から IMP にかけて伸展トルクが発揮されていた。規格化時間 68-100%にかけて, IMP のバットヘッドスピードと有意な負の相関関係が認められた。関節角速度は, 関節トルクと同様に, SFC から MRV 付近にかけて屈曲角速度, MRV 付近から IMP にかけて伸展角速度を示していた。いずれの時点においても IMP のバットヘッドスピードの有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, 分析範囲を通して正のパワー発揮を示した。規格化時間 74-100%にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた。内外転軸において(図 4-3b), 関節トルクは, SFC から規格化時間 90%付近にかけて内転トルク, その後 IMP にかけて外転トルクが発揮されていた。いずれの時点においても IMP のバットヘッドスピードの有意な相関関係は認められなかった。関節角速度は, SFC から規格化時間 70%付近にかけて内転角速度が漸増し, その後 IMP にかけて減少していた。いずれの時点においても IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, SFC から MRV 付近にかけて正のパワーが漸増し, その後規格化時間 90%付近で負のパワーに転じた。いずれの時点においても IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。内外旋軸において(図 4-3c), 関節トルクは, SFC から規格化時間 40%付近にかけて外旋トルク, その後インパクト直前にかけて内旋トルク, インパクト直前では再び外旋トルクが発揮されていた。SFC 付近から規格化時間 40%付近にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた。関節角速度は, SFC から規格化時間 30%付近にかけて外旋角速度, その後 IMP にかけて内旋角速度を示していた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, SFC から規格化時間 90%にかけて正のパワー, その後 IMP にかけて負のパワーが発揮されていた。

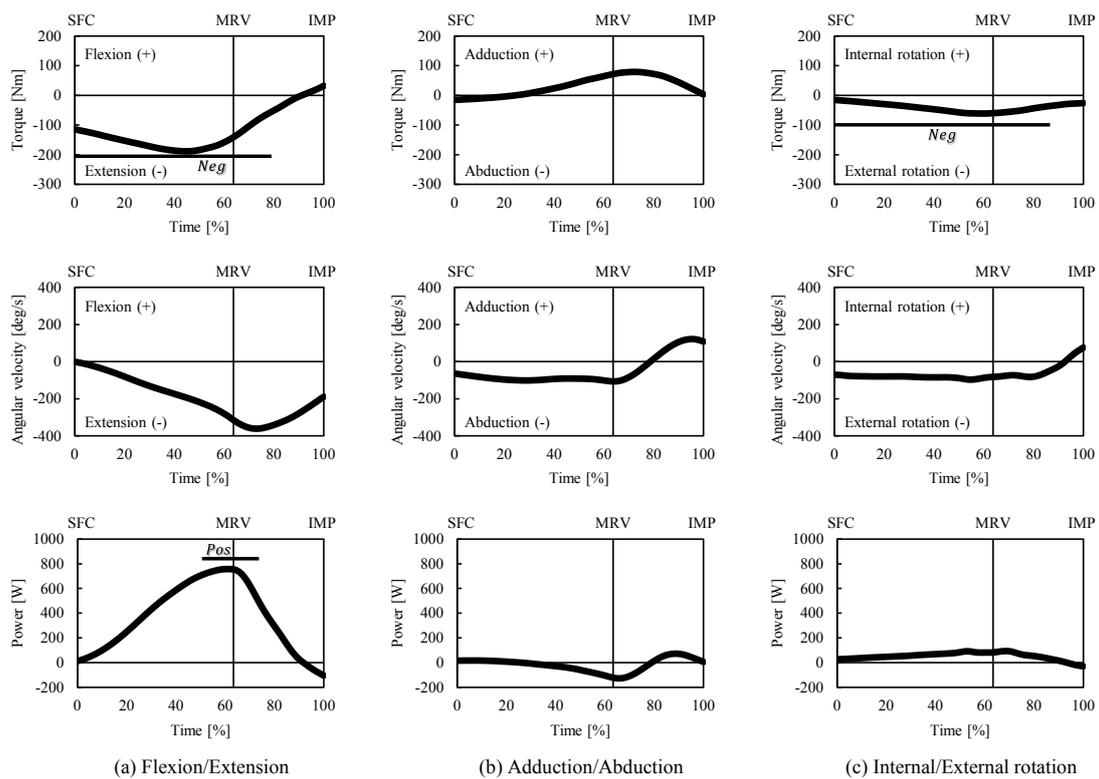


Pos: Positive correlation to the bat head speed at impact
Neg: Negative correlation to the bat head speed at impact

図4-3 投手側の股関節におけるトルク, 角速度, トルクパワーの時系列変化

3.3. 捕手側の股関節における関節トルク, 関節角速度, 関節トルクパワー

図 4-4 は, 捕手側の股関節トルク, 股関節角速度および股関節トルクパワーの時系列変化について全被験者の平均値を示したものである。屈曲伸展軸において(図 4-4a), 関節トルクは, SFC から規格化時間 90%付近にかけて伸展トルク, その後 IMP にかけて屈曲トルクが発揮されていた。SFC から規格化時間 80%にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な負の相関関係が認められた。関節角速度は, SFC から規格化時間 70%付近にかけて伸展角速度が漸増し, その後 IMP にかけて減少していた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, SFC から規格化時間 90%にかけて正のパワー, その後 IMP にかけて負のパワーが発揮されていた。規格化時間 48-76%にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた。内外転軸において(図 4-4b), 関節トルクは, SFC から規格化時間 70%付近にかけて内転トルクが漸増し, その後 IMP にかけて減少していた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節角速度は, SFC から規格化時間 80%にかけて外転角速度, 80%から IMP にかけて内転角速度を示していた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, SFC から規格化時間 80%にかけて負のパワー, その後 IMP にかけて正のパワーが発揮されていた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。内外旋軸において(図 4-4c), 関節トルクは, SFC から IMP にかけて外旋トルクが発揮されていた。SFC から規格化時間 90%付近にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な負の相関関係が認められた。関節角速度は, SFC から規格化時間 90%付近にかけて外旋角速度, その後 IMP にかけて内旋角速度を示していた。いずれの時点においても, IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。関節トルクパワーは, SFC から IMP 直前にかけて正のパワー, その後 IMP にかけて負のパワーが発揮されていた。規格化時間 66-72%にかけて IMP のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた。



Pos: Positive correlation to the bat head speed at impact
Neg: Negative correlation to the bat head speed at impact

図4-4 捕手側の股関節におけるトルク, 角速度, トルクパワーの時系列変化

3.4. 股関節トルクによる力学的仕事

図 4-5 は、投手側および捕手側の股関節トルクによる力学的仕事を局面ごとに示したものである。SFC-MRV において(図 4-5a), 投手側の股関節では 66.3 ± 20.4 J の力学的エネルギーが発生していた。特に、屈曲伸展トルクおよび内外転トルクによる力学的エネルギーの発生が大きく、発生量の約 85%を占めていた。いずれの関節トルクによる力学的エネルギーの発生量にも IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかった。捕手側の股関節では 81.3 ± 20.9 J の力学的エネルギーが発生していた。特に、屈曲伸展トルクによる力学的エネルギーの発生が大きく、発生量の約 85%を占めていた。屈曲伸展トルクおよび内外旋トルクによる力学的エネルギーの発生量と IMP のバットヘッドスピードにそれぞれ有意な正の相関関係が認められた ($r=0.329, p<0.01$; $r=0.271, p<0.01$)。MRV-IMP において(図 4-5b), 投手側の股関節では 54.1 ± 21.5 J の力学的エネルギーが発生していた。特に、屈曲伸展トルクおよび内外転トルクによる力学的エネルギーの発生が大きく、発生量の 90%を占めていた。また、屈曲伸展トルクによる力学的エネルギーの発生量と IMP のバットヘッドスピードに有意な正の相関関係が認められた ($r=0.391, p<0.01$)。捕手側の股関節では 31.1 ± 15.4 J の力学的エネルギーが発生していた。特に、屈曲伸展トルクによる力学的エネルギーの発生が大きく、発生量の約 70%を占めていたが、SFC-MRV 局面と比較して、全体の発生量は小さく、いずれの関節トルクによる力学的エネルギーの発生量とも IMP のバットヘッドスピードに有意な相関関係は認められなかった。

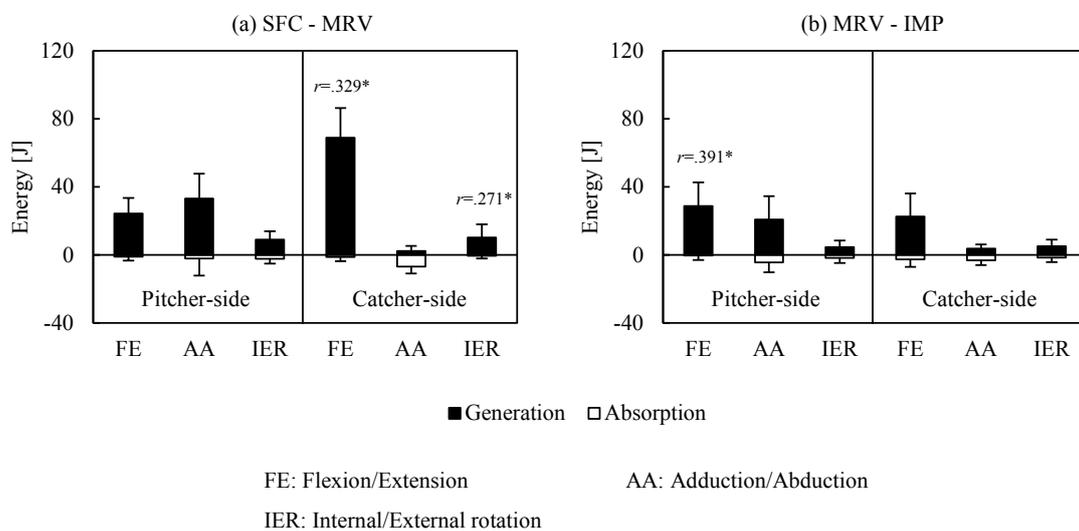


図4-5 左右の股関節で発生・吸収された力学的エネルギー
*: インパクト時のバットヘッドスピードとの有意な相関関係 ($p < 0.01$)

4. 考 察

4.1. 投手側の股関節について

SFC-MRV において、IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係は認められなかったものの、屈曲トルクおよび内転トルクによる力学的エネルギーの生成が大きかった(図 4-3ab, 6a)。野球のティーバッティング動作中における下肢のキネティクスについて調査した研究においても(Ae et al., 2017), スイング動作を通して投手側の股関節における屈曲トルクおよび内転トルクによる正の力学的仕事が顕著に大きかったことが報告されている。また、SFC 付近から規格化時間 40%付近において内外旋トルクと IMP のバットヘッドスピードに有意な負の相関関係が認められたが、内外旋トルクによって生成された力学的エネルギーは極めて小さかった。そのため、投手側の股関節における内外旋トルクが IMP のバットヘッドスピードに及ぼす影響は小さいと考えられる。これらのことから、投手側の股関節における屈曲トルクおよび内転トルクは力学的エネルギーの生成に寄与しており、バットへ伝達させるための力学的エネルギーの絶対量の増大に貢献していると考えられる。

MRV から IMP において、IMP のバットヘッドスピードと伸展トルクの大きさおよび伸展トルクによって生成された力学的エネルギーとの間に有意な正の相関関係が認められた(図 4-4a, 4-6b)。この結果は、伸展トルクの発揮および伸展トルクによる正のパワー発揮が大きいほど、IMP のバットヘッドスピードが大きかったことを意味している。野球あるいはソフトボールのバッティング動作中における股関節トルクが骨盤の回旋運動に及ぼす影響について検討した研究(Ae et al., 2017; Iino et al., 2014)では、インパクト直前における投手側の股関節における伸展トルクの骨盤の回旋運動に対する貢献は小さいことが報告されている。このことから、MRV-IMP において投手側の股関節で発揮される伸展トルクは、骨盤の回旋運動を生成するために発揮されているものではないことが推察される。野球のバッティングでは、IMP にかけてバットヘッドスピードが増大し、それに伴ってバットの遠心力も増大する(阿江ほか, 2013; 森下ほか, 2015)。そのため、IMP の直前において、上肢ではバットグリップ側の肩関節の外転トルク、体幹関節では後屈トルクを発揮し、バットの遠心力に抗することで打撃姿勢を維持していると考察されている(阿江ほか, 2013; 阿江ほか, 2015)。投手側の股関節の伸展トルクについても、バットスイング中における打撃姿勢を維持するため、バットの

遠心力に抗する役割を果たしていると考えられる。

4.2. 捕手側の股関節について

SFC-MRV において、伸展トルクによる力学的エネルギーの生成が大きく、IMP のバットヘッドスピードと有意な正の相関関係が認められた(図 4-4a, 図 4-5a)。また、力学的エネルギーの生成は大きくなかったものの、外旋トルクによる力学的エネルギーの生成とIMP のバットヘッドスピードとの間においても有意な正の相関関係が認められた(図 4-4c, 図 4-5a)。前述した野球およびソフトボールのバッティング動作に関する先行研究において(Iino et al., 2014; 高木ほか, 2010), 捕手側の股関節の伸展トルクおよび外旋トルクは投球速度や打点高の違いに関わらず骨盤の回転に貢献すると報告されている。Energetics 的観点からみても、捕手側の股関節の伸展トルクおよび外旋トルクは力学的エネルギーの生成に寄与しており、バットへ伝達させるための力学的エネルギーの絶対量の増大に貢献していることが推察される。加えて、Shaffer et al.(1993)は、投手側の足部の接地からスイング中盤にかけて捕手側の大臀筋の活動レベルが高いことを報告し、パワーの発揮に貢献すると考察している。大臀筋の主な働きは股関節の伸展および外旋であることから、本研究の結果は上述した先行研究の考察を具体的に支持するものであるといえる。

MRV-IMP において、SFC-MRV と比較して生成された力学的エネルギーは小さく、IMP のバットヘッドスピードと有意な相関関係も認められなかった(図 4-5b)。第 3 章の結果において、MRV-IMP では体幹関節で生成された力学的エネルギーが関節トルクによって上胴部へ流入し、上胴部で留まることなく上肢およびバットへ伝達される局面であることが考察されている。これらのことから、野球のバッティングにおいて、インパクト直前での捕手側の股関節における力学的エネルギー生成としての役割は小さいことが推察される。

5. 概括

本章では、野球のバッティング動作においてバットヘッドスピードに関連する股関節のダイナミクスについて検討し、以下のことが明らかになった。

1. 投手側の足部接地から骨盤回旋角速度が最大に達するまでの局面 (SFC-MRV) において、投手側の股関節では、屈曲トルクおよび内転トルクによって力学的エネルギーが生成されていた。
2. SFC-MRV において、捕手側の股関節では、伸展トルクによって力学的エネルギーが生成され、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められた。
3. 骨盤回旋角速度が最大に達してからインパクトするまでの局面 (MRV-IMP) において、投手側の股関節では、伸展トルクによって力学的エネルギーが生成されており、インパクト時のバットヘッドスピードと有意な相関関係が認められた。
4. MRV-IMP において、捕手側の股関節では、SFC-MRV と比較して、力学的エネルギーの生成は小さかった。

これらのことから、野球のバッティングにおいて、投手側の股関節では屈曲および内転トルク、捕手側の股関節では伸展トルクによって力学的エネルギーが生成されていた。加えて、インパクト直前に投手側の股関節において発揮された伸展トルクは、バットの遠心力に抗するために発揮されていたと考えられる。

第5章 総合考察

本論文における目的は、野球のバッティングにおけるバットヘッドの加速メカニズムを明らかにすることであった。そのため、以下の3つの研究課題について検討した。

1. バットヘッドの加速メカニズムを運動学および力学的観点から明らかにすること(第2章)
2. 下肢および体幹における力学的エネルギーの流れおよびその発生・吸収を定量化すること(第3章)
3. 力学的エネルギーの生成に関連する左右の股関節のダイナミクスを記述し、インパクト時のバットヘッドスピードとの関係について検討すること(第4章)

本章では、上述した研究課題から得られた知見を総合し、野球のバッティングにおけるバットヘッドの加速メカニズムについて考察する。

投手側の足部が接地してから骨盤の回旋角速度が最大になるまでの局面において、左右の股関節で大きな力学的エネルギーが発生していた(図 3-7a)。特に、投手側の股関節では屈曲トルクおよび内転トルク、捕手側の股関節では伸展トルクによる力学的エネルギーの発生が顕著に大きかった(図 4-5a)。これらの股関節トルクは、野球あるいはソフトボールのバッティング動作において骨盤の回旋運動に大きく貢献すると報告されてきたが(Iino et al., 2014; 高木ほか, 2010)、力学的エネルギーの生成にも貢献していることが明らかになった。また、左右の股関節トルクによる正味の力学的仕事は、他の下肢関節トルクあるいは体幹関節トルクによるものと比べて大きかった(図 3-7a)。野球のバッティング動作中における下肢関節トルクによる力学的仕事を定量化した先行研究(Ae et al., 2017)においても、本研究と同様の結果が報告されている。これらのことから、野球のバッティングにおいて、左右の股関節は力学的エネルギーの発生源としての役割を果たしていることが推察された。特に、捕手側の股関節における伸展トルクによって生成された力学的エネルギーは大きく、インパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な相関関係($r=0.329$, $p<0.01$)が認められた(図 4-5a)。加えて、捕手側の伸展トルクとインパクト時のバットヘッドスピードとの間にも有意な

相関関係が認められた(図 4-4a). このことから, バッティング動作中における捕手側の股関節の伸展トルクの発揮能力が, インパクト時のバットヘッドスピードと関連する可能性が推察される. そのため, 股関節の伸展筋群に対するトレーニングが, インパクト時のバットヘッドスピードの大きさに及ぼす影響について検討することは, 今後の研究課題であるといえる.

同局面において, 左右の股関節で発生した力学的エネルギーは股関節トルクによって下胴部へ流入し, 体幹関節トルクによって上胴部へ流出していた(図 3-5a). しかしながら, 大きな力学的エネルギーが体幹へ流入していたにもかかわらず, 体幹の力学的エネルギーに顕著な増大がみられなかった(図 3-3c). 野球のティーバッティング動作における体幹のキネティクスについて検討した研究(阿江ほか, 2015)からは, スイング開始時点からボールインパクトまでの局面において, 上胴部へ流入した力学的エネルギーは, 同時にそのほとんどが投手側の上腕部へ流出していた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動作において, 体幹へ流入した力学的エネルギーは体幹で留まることなく一気に上肢へ伝達されていたと考えられる. そのため, 野球のバッティングにおいて, 体幹は力学的エネルギーの伝達経路としての役割を果たしていることが推察される.

また, 体幹関節における力学的エネルギーの発生および吸収は, 左右の下肢関節と比べて顕著に大きく(図 3-7), 特に左右回旋トルクに起因する成分が大きかった(図 3-6). 体幹関節の左右回旋は, 野球のバッティングにおいて体幹部の捻転に関連する動作であり, 指導現場における着眼点の1つである(金堀ほか, 2012). 田内ほか(2005)は, 下胴部が上胴部に対して先行して投手側へ回転することによって生じる体幹部の捻転角速度が上胴部を捻り戻す際の角加速度を高めることに貢献し, 間接的にバットヘッドスピードの大きさに対して正の影響を及ぼすことを示唆している. これは, 体幹筋群における伸張-短縮サイクル(Stretch-Shortening Cycle: SSC)が生じることによる効果であると考察されている. しかしながら, 本論文の結果において, 下胴部の回旋角速度が最大に達してからインパクトするまでの局面における体幹関節トルクによる正の力学的仕事とインパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な相関関係は認められなかった(図 3-7b). 野球のティーバッティング動作中における体幹のキネティクスについて関する研究(阿江ほか, 2015)においても,

体幹関節の左右回旋トルクによる正の力学的仕事とバットヘッドスピードの最大値との間の相関関係は強くないことが報告されている。この結果から、体幹関節の左右回旋トルクによる正の力学的仕事がバットヘッドスピードの最大値に対して及ぼす影響は小さいと考察されている。加えて、下肢や体幹で生成した力学的エネルギーを、左右の上肢を介して効率的に伝達することが、バットヘッドスピードを生成する技術要因の 1 つであると示唆されている。先行研究(田内ほか, 2005)においても述べられているが、体幹の捻転動作は一連のバッティング動作の途中であり、インパクト時のバットヘッドスピードに対して直接的に影響を及ぼすと考えることは現実的ではない。これらのことから、上胴部が捻り戻される際において体幹関節で生成される力学的エネルギーの大きさではなく、体幹関節で生成された力学的エネルギーを効率的に上胴部へ伝達する技術(動作や力発揮のタイミングなど)やその技術とインパクト時のバットヘッドスピードとの関係についての検討が今後の研究課題であるといえる。

バットスイングの中盤から、バットグリップに対して両手部によってトルクが発揮され(図 2-6)、同様にバットグリップに作用するトルクによるパワーも正の値を示していた(図 2-7)。しかしながら、グリップトルクによるバットの回転パワーおよびバットへ流入した回転の運動エネルギー(図 2-8)とインパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な相関関係は認められなかった。森下ほか(2015)は、順動力学演算を用いてバットヘッドスピードに対するグリップ力およびグリップトルクの貢献度について検討している。その結果、グリップトルクが生成するインパクト時のバットヘッドスピードは概ね 30%程度のみであることを報告している。そのため、インパクト時のバットヘッドスピードに対するグリップトルクの貢献度は大きくないことが推察され、各変数間における相関関係も強くなかったものと考えられる。また、インパクト付近において、このトルクの発揮が減衰していた。これは、インパクト直前において、バットが高速で回転していたことから、手関節周辺の骨格筋における力-速度関係によって発揮されるトルクが減少したためであると推察される。

バットスイングの後半以降において、バットの長軸方向へ発揮される力が急増し、インパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な相関関係が認められた(図 2-6)。先行研究(阿江ほか, 2013; 森下ほか, 2015)においても、バットの長軸方向へ発揮される力がバットヘッドスピードに対する貢

献することが報告されている。しかしながら、この力がどのようなメカニズムでバットヘッドを加速させているのかについては上記の先行研究では言及されていない。スイング動作において、スイング物の長軸方向に作用する力がスイング物の加速に貢献する場合、そのメカニズムは 2 つに大別できると考えられる。1 つは、スイング物の長軸方向に作用する力が、スイング物の曲率半径を短縮させることでスイング物の加速度が増大するというメカニズムである。回転動作という観点において野球のバッティング動作と類似するハンマー投げでは、この加速メカニズムによってハンマーヘッドが加速されることが明らかになっている (Dapena and Feltner, 1989; 坂東ほか, 2006)。もう 1 つは、スイング物の長軸方向に作用する力によってスイング物へ力学的エネルギーが流入することで、スイング物の速度が増大するというメカニズムである。本論文の結果から、バットの長軸方向へ発揮される力は、バットヘッドスピードの平方と極めて高い相関関係にあることが明らかになった (図 2-9)。加えて、バットヘッドの加速度の変化に関わらず、曲率半径は単調増加していた (図 2-5 右)。これらの結果は、バットの長軸方向へ発揮される力は、バットの遠心力に対してある割合で抗する程度に発揮されており、バットヘッドの曲率半径を小さくするほど発揮されていないことを示唆している。また、同局面において、バットの長軸方向へ発揮される力の急増と同様に、バットグリップに作用する力によるバットの並進パワーが急増していた (図 2-7)。バットグリップに作用する力によってバットへ流入した並進の力学的エネルギーは、インパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な相関関係 ($r=0.826, p<0.001$) が認められた (図 2-8)。これらのことから、バットスイング中にバットへ流入する並進の運動エネルギーは、概ねバットの長軸方向へ作用する力に起因し、バットヘッドスピードの大きさに強く関連することが推察された。以上より、野球のバッティングにおいて、バットの長軸方向へ作用する力は、バットへ力学的エネルギーを流入させることによって、バットヘッドスピードの増大に貢献していることが示唆された。そして、野球のバッティングにおいて、バットへ流入出する力学的エネルギーは、グリップに作用するトルクによって回転の運動エネルギーが流入した後、グリップに作用する力によって並進の運動エネルギーがバットへ流入することが明らかになった。つまり、異なるタイミングで並進および回転の運動エネルギーがバットへ流入することによって、バットヘッドが加速されることが考えられる。

最後に、野球のバッティング動作では、左右の上肢およびバットによって閉ループ系が構築される。そのため、本論文では、上肢各関節に作用する力およびトルクの推定ができていない。それに付随して、バットに力やトルクを及ぼす際の左右各手の役割や上胴部から上肢、バットにかけての力学的エネルギーの流れについて言及できていない。これらの点が本論文における方法的限界である。また、実際の野球のバッティングでは、上下あるいは左右のコースに様々な球速や球種でボールが投球され、打者はそのボールに対応してバッティング動作を行わなければならない。対して、本論文では、分析対象者にストライクゾーン中央付近にトスされたボールに対して最大努力でトスバッティングを行わせている。そのため、本論文で得られた知見は、打者が自身のタイミングでバッティング動作を行った際の特徴が抽出されていることに留意する必要がある。

第6章 総括

本論文では、多数の幅広い競技レベルの野球選手を対象として、野球のバッティングにおけるバットヘッドの加速メカニズムについて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- I. バットスイング開始(バットヘッドスピードが 1 m/s 以上)からインパクトにかけて、バットヘッドの加速度はインパクト直前にピークに達していたのに対して、バットヘッドの曲率半径は単調増加していた。(第2章)

- II. バットスイングの中盤からインパクト直前の局面において、スイング平面に対して垂直な軸周りのトルクの発揮によって回転の運動エネルギーがバットへ流入していた。また、バットスイング後半からインパクトまでの局面において、バット長軸方向への力によって並進の運動エネルギーがバットへ流入しており、バットへ流入した並進の運動エネルギーとインパクト時のバットヘッドスピードとの間に有意な正の相関関係が認められた。(第2章)

- III. 投手側の足部接地から骨盤回旋角速度が最大に達するまでの局面において、左右の股関節で大きな力学的エネルギーが発生し、関節トルクによって左右の股関節から下胴部へ力学的エネルギーが流入していた。さらに、関節トルクによって下胴部から体幹関節へ力学的エネルギーが流出していた。(第3章)

- IV. 骨盤回旋角速度が最大に達してからインパクトするまでの局面において、体幹関節で大きな力学的エネルギーが発生し、関節トルクによって体幹関節から上胴部へ力学的エネルギーが流入していた。(第3章)

V. 投手側の足部接地から骨盤回旋角速度が最大に達するまでの局面において、投手側の股関節では屈曲トルクおよび内転トルク、捕手側の股関節では伸展トルクによって大きな力学的エネルギーが生成されていた。(第4章)

これらの知見から、野球のバッティング動作では、投手側の足部が接地してから骨盤の回旋角速度が最大に達するまでの局面において、投手側の股関節では屈曲トルクおよび内転トルク、捕手側の股関節では伸展トルクによって主に力学的エネルギーが生成され、左右それぞれの股関節トルクによって下胴部へ流入、さらに体幹関節トルクによって下胴部から体幹関節へ流出することが明らかになった。さらに、骨盤の回旋角速度が最大に達してからインパクトするまでの局面において、体幹関節トルクによって生成された力学的エネルギーが上胴部へ流入し、上肢を介してバットへ伝達させることによってバットヘッドが加速することが示唆された。また、バットへ力学的エネルギーが流入する際には、グリップに作用するトルクによって回転の運動エネルギーが流入した後、グリップに作用する力によって並進の運動エネルギーがバットへ流入することが明らかになった。

以上のように、本論文によって、これまで十分に検討されていなかった野球のバッティング動作における下肢から体幹にかけての力学的エネルギーの流れやバットが加速される過程におけるバットグリップに作用する力学的要因について定量的に明らかにすることができた。これらの知見は、バッティング動作そのものを観察するのみでは得られないため、野球のバッティング動作における力発揮の感覚や様子、タイミングを共有するなど、野球のバッティング技術の指導において有用な情報になることが期待される。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました中京大学スポーツ科学部の桜井伸二教授に深く感謝申し上げます。桜井先生には、学部、修士課程そして博士課程と、長きにわたりご指導いただきました。研究指導に留まらず、研究者としての考え方や心得あるいは人間力などを学ばせていただいたように感じております。

本論文の副査を引き受けて頂きました中京大学スポーツ科学部の田内健二准教授、光山浩人教授には、本論文を執筆する上で大変貴重なご指摘やご意見をいただきましたこと、感謝申し上げます。

中京大学大学院体育学研究科の応用スポーツ科学系の皆様には、データの収集や分析、解釈、論文の執筆などに対して貴重なご意見やご指摘をいただきましたこと、感謝申し上げます。また、他系の教員、学生の皆様とは、様々な場面でスポーツ科学について議論することができ、他分野ならではの視点や分析手法などについて学ぶ機会に触れさせていただきました。中京大学大学院体育学研究科の大学院生として、大変幸せな時間を過ごすことができました。

データの収集に際して、快くご協力いただきました中京大学硬式野球部の半田卓也監督をはじめ、部員の皆様には大変感謝しております。中京大学硬式野球部のご活躍を心から応援しております。

最後に、大学院への進学を支援していただいた両親に何よりも感謝の気持ちを表したいです。

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.
- 阿江数通・小池関也・川村卓 (2015) 打点高の異なる野球ティー打撃動作における体幹のキネティクスの分析. *体育学研究*, 60(2): 635-649.
- Ae, K., Koike, S., Fujii, N., Ae, M. and Kawamura, T. (2017) Kinetic analysis of the lower limbs in baseball tee batting. *Sports Biomechanics*, 16(3): 1-14.
- 阿江通良・湯海鵬・横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム*, 11: 23-33.
- 坂東美和子・田辺智・伊藤章 (2006) ハンマー投げ記録とハンマーヘッド速度の関係. *体育学研究*, 51(4): 505-514.
- Dapena, J. and Feltner, M. E. (1989) Influence of the direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations during hammer throwing. *Journal of Biomechanics*, 22(6-7): 565-575.
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., DeRenne, C., Taylor, M. K., Moorman III, C. T., Imamura, R., Barakatt, E. and Andrews, J. R. (2009) A comparison of age level on baseball hitting kinematics. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(3): 210-218.
- Gordon, D., Robertson, E. and Winter, D. A. (1980) Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking. *Journal of Biomechanics*, 13(10): 845-854.
- Hill, A. V. (1938) The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 126(843): 136-195.
- 平野裕一 (1984) バットによる打の動作. *Japanese Journal of Sports Science*, 3(3): 199-208.
- Iino, Y., Fukushima, A. and Kojima, T. (2014) Pelvic rotation torque during fast-pitch softball hitting

- under three ball height conditions. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(4): 563-573.
- Inkster, B., Murphy, A., Bower, R. and 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.
- 金堀哲也・川村卓・松尾知之・朝岡正雄・山田幸雄・曾田宏 (2012) 我が国の指導書からみた野球の打撃指導における指導者の着眼点-動作局面における指導対象部位に着目して-. *コーチング学研究*, 25(2): 149-156.
- 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.
- Koike, S., Iida, H., Kawamura, T., Fujii, N. and Ae, M. (2004) An instrumented bat for simultaneous measurement of forces and moments exerted by the hands during batting. *The Engineering of Sport*, 5(2): 194-200.
- 倉林準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. *バイオメカニズム学会誌*, 27(1): 29-36.
- Major League Baseball (online) MLB.com: Statcast Leaderboard. <http://m.mlb.com/statcast/leaderboard#exit-velo,r,2016>, (参照日:2017年9月30日).
- Mcintyre, D. R. and Pfausch, E. W. (1982) A kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 53(3): 206-213.
- Milanovich, M. and Nesbit, S. M. (2014) A three-dimensional kinematic and kinetic study of the college-level female softball swing. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(1): 180.
- Miura, K. (2001) Parametric acceleration - The Effect of inward pull of the golf club at impact stage. *Sports Engineering*, 4(2): 75-86.
- 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.
- 森下義隆・平野裕一・矢内利政 (2015) 野球打撃におけるインパクト時のバットのヘッドスピードと方位を決定する力学的要因. バイオメカニクス研究, 19(4): 201-215.
- 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.
- Nakata, H., Miura, A., Yoshie, M., Kanosue, K. and Kudo, K. (2013) Electromyographic analysis of lower limbs during baseball batting. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(5): 1179-1187.
- Nunome, H., Ikegami, Y., Kozakai, R., Apriantono, T. and Sano, S. (2006) Segmental dynamics of soccer instep kicking with the preferred and non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences*, 24(5): 529-541.
- 布目寛幸 (2011) サッカーのキックにみられるムチ動作のダイナミクス. 体育の科学, 61(7): 509-513.
- Race, D. E. (1961) A cinematographic and mechanical analysis of the external movements involved in hitting a baseball effectively. *Research Quarterly*, 32(3): 394-404.
- Shaffer, B. E. N., Jobe, F. W., Pink, M. and Perry, J. (1993) Baseball batting: An electromyographic study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 292: 285-293.
- Szymanski, D. J., McIntyre, J. S., Szymanski, J. M., Bradford, T. J., Schade, R. L., Madsen, N. H. and Pascoe, D. D. (2007) Effect of torso rotational strength on angular hip, angular shoulder, and linear bat velocities of high school baseball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(4): 1117-1125.
- Szymanski, D. J., DeRenne, C. and Spaniol, F. J. (2009) Contributing factors for increased bat swing velocity. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(4): 1338-1352.
- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久 (2006a) 野球における打撃ポイントの高さが打撃動作に及ぼす影響. バイオメカニクス研究, 10(1): 2-13.

- 田子孝仁・阿江通良・藤井範久 (2006b) 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.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良 (2010) 異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関する下肢および体幹部のキネティクスの研究. バイオメカニクス学会誌, 34(3): 216-224.
- 田内健二・南形和明・川村卓 (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.
- 和達三樹 (1983) 物理のための数学. 岩波書店, pp. 97-124.
- Welch, C. M., Banks, S. A., Cook, F. F. and Draovitch, P. (1995) Hitting a baseball: A biomechanical description. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 22(5): 193-201.
- Winter, D. A. (2009) *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). John Wiley & Sons, pp. 176-199.
- 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.
- Yu, B., Gabriel, D., Noble, L. and An, K. N. (1999) Estimate of the optimum cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter. *Journal of Applied Biomechanics*, 15(3): 318-329.