

早稲田大学審査学位論文  
博士（スポーツ科学）

野球の打撃におけるバットのローリング  
- そのメカニズム，個人差および増大方法 -

The rolling of the bat in baseball batting  
- Its mechanism, individual variability and  
an approach for improvement -

2016年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

谷中 拓哉

YANAKA, Takuya

研究指導教員： 矢内 利政 教授

## 目次

### 第1章 序論

1. はじめに . . . . . 1
2. 研究小史 . . . . . 4

### 第2章 野球の打撃における上肢の捻り運動

1. はじめに . . . . . 28
2. 方法 . . . . . 30
3. 結果と考察 . . . . . 38
4. まとめ . . . . . 46

### 第3章 野球の打撃におけるバットのローリング発生メカニズム

1. はじめに . . . . . 47
2. 方法 . . . . . 50
3. 結果と考察 . . . . . 60
4. まとめ . . . . . 75

### 第4章 野球の打撃におけるローリング角速度の個人差の力学的要因

1. はじめに . . . . . 76
2. 方法 . . . . . 77
3. 結果 . . . . . 83
4. 考察 . . . . . 85
5. まとめ . . . . . 97

## 第5章 ローリングを高めるためのスイング

1. はじめに	98
2. 方法	99
3. 結果	101
4. 考察	103
5. まとめ	109

## 第6章 総括論議

## 第7章 結論

参考文献	119
------	-----

謝辞	123
----	-----

## 第1章 序論

### 1. はじめに

スポーツにおける打撃動作は多岐にわたる。平野 (1992) は、スポーツにおける「打つ」動作を「道具を含めた体の端を効果器とし、衝撃力を大きくするためにそれを加速し、ボールあるいはヒトといった対象物にその衝撃力を与えること」と定義している。すなわち、我々が普段、目にする野球のバッティングやテニスのストロークに加え、サッカーのキックやバレーのスパイク、ボクシングのパンチなども打撃動作なのである。野球やテニス、ゴルフは身体の末端ではなく、打具を用いてボールを打撃する代表的なスポーツである。これらの打撃動作において、状況に応じて選手は意図した方向へ速い打球を放つために、バットやラケット、ゴルフクラブといった打具を巧みにコントロールしながら力強くスイングする。これらの打撃動作は打具を操るため、身体の末端を打撃させる他のスポーツよりも高度な技術を要する動作であると考えられる。

野球の打撃では、ヒットやホームランとなるような野手の間を抜ける高速な打球や野手の頭上を越えるような飛距離の大きい打球を打つことが求められる。近年では、投手が投じる直球の多くは 150km/h を越え、リリース位置からキャッチャーミットまで約 0.45 秒というわずかな時間で到達する。打者は、その高速でさらに様々な軌道のボールを 0.3 秒にも満たないわずかな時間で到達位置を判断・予測して打撃する必要がある (Breen 1967)。また、到達位置を予測できたとしても、バットをコントロールし、ボールを「芯」と呼ばれる反発係数が高いエリアでインパクトしなければ速い速度の打球を放つことができない。これらを考慮すると、野球の打撃においてヒットやホームランとなるような痛烈な打球を放つことがいかに困難であるかがわかる。より高速度な打球を放つために、バットのヘッドスピードを高めることが一つの方法であり、これを達成するために打撃中の身体運動、打者の体力要素、バットに作用させる力・モーメントといった様々な視点から研究がなされてきた。

バットの運動を詳細にみると、バット重心の並進曲線運動と重心まわりのバット長軸の回転運動およびバットの長軸まわりの回転運動によって構成されている (図 1-1)。

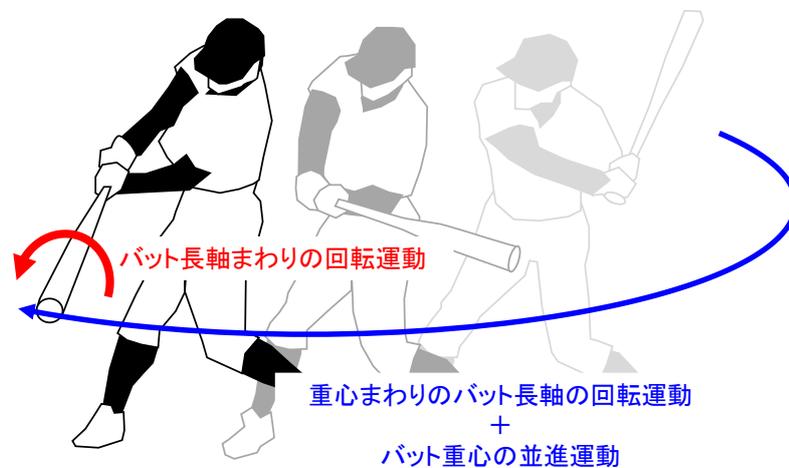


図 1-1 野球の打撃におけるバットの運動

これまでの研究で着目されてきたバットのヘッドスピードは、これらのうちのバット重心の曲線運動速度と重心まわりのバット長軸の回転速度によって決定される。一方で、バット長軸まわりの回転運動は、スイング中に投手方向へ転がるように (トップスピン方向) 回転しており、インパクト直前には  $1700^\circ/\text{s}$  まで達すること (城所ら 2011) が報告されている。このバット長軸まわりの回転は「ローリング」と呼ばれ、ローリングの回転速度は打球の回転数に影響を及ぼし、打球の飛距離や運動エネルギーに関連することが報告されている (Sawicki et al. 2003, 城所ら 2011, 志村ら 2012)。これらの先行研究の結果は、ローリングの回転速度の増大が打者のパフォーマンスを向上させることを示している。Sawicki et al. (2003) はローリングの回転速度を高めることによって打球の飛距離が大きくなるが、ローリングを高めようとする動作を行うことは不自然なスイングになり、ヘッドスピードを減少させてしまう可能性があるため、逆効果であると主張している。これは、リストターンと呼ばれる前腕の回旋運動の組み合わせ (引手 [右打者の左手] 前腕の回外, 押手 [右打者の

右手] 前腕の回内) を意図的に行うことを想定されたものであると考えられる。しかしながら、実際の打撃中にローリングがどのように生じているかは明らかとなっていないため、ローリングを高める動作自体がスイング中に不自然な動作となるかは疑問である。そこで本学位論文では、①野球の打撃におけるリストターンが生じるタイミング、②野球の打撃におけるローリングを発生させるメカニズム、③ローリングの回転速度の個人差を生じさせる要因、④ローリングを高めるスイング、を調べることによって、実際の打撃において打者がどのようにローリングの回転速度を高めれば良いのかを明らかにすることを目的とした。

## 2. 研究小史

野球では打者の成績が、打率・本塁打・打点で表されるように、打者の最大の役割は、得点を多く獲得するために、ヒットやホームランを多く放つことである。日本プロ野球界において「打率 3 割，本塁打 30 本，打点 100」が強打者の目安とされている昨今，このような成績に到達する打者が 1 人も存在しないシーズンがあるほど，投手のレベルが高くなっている。また，高校野球においても 2000 年代に入り，直球の球速が 150km/h を越える投手が多くみられるようになってきている。このようにプロ野球やアマチュア野球では，レベルの高い投手を相手に打者はヒットやホームランを打たなければならない。

ヒットやホームランとなるような打球の特徴は，野手の間を抜けるように打球の速度が速いこと，および野手の頭上を越えるような打球の飛距離が大きいことである。これらを実現するための要因を力学的に考えると，打球の初速，打球の飛翔角度，打球の回転数といった打球の特性が鍵を握る。打球の特性は，インパクトする瞬間のバットの振る舞い（スイング特性）やバットに対するボールのインパクト位置（インパクト特性）によって決定される。そのため，打者がどのようにスイングし，どのようにバットとボールをインパクトさせればよいのかを明らかにすることを目的に，これまで多くの研究がなされてきた。本節では，打球の特性に影響を及ぼすスイング特性やインパクト特性についてこれまでの研究をまとめるとともに，バットのローリングに関する知見とその問題点について検証する。

### 2.1 打球とバットのヘッドスピードとの関係

打球の飛距離は，打球の初速と飛翔角度，発射高によって決定する。つまり，打球の初速を大きくすることは，野手の間を抜きやすくなることに加え，大きな打球飛距離を獲得することができるため，ヒットやホームランとなる確率が高くなる。これらの理由から，打者はヒット，ホームラン問わず初速が大きい打球を放つことを第一の目的とする。打球の初速を大きくする方策を考える場合，バットとボールの衝突を力学的に見ると，打者がどのように

すればいいかを示すことができる。そこで、運動量-力積の関係からバットとボールの衝突について考える。インパクト直後の打球の運動量は、インパクト直前の投球の運動量とボールに作用した力積の和によって表せる。

$$mv_0 + \int_{t_1}^{t_0} F dt = mv_1$$

(式 1-1)

$m$  はボールの質量， $v$  はボールの速度， $F$  はボールに作用した力， $t$  は時刻をそれぞれ示している。また下付きの数字はインパクト前後を示しており，0 はインパクト直前を，1 はインパクト直後を表している。なお，インパクト直後とはボールがバットから離れ，飛翔し始めた瞬間を示す。式 1-1 から打球の速度を大きくする上ではボールに作用させる力積の大きさが重要であることがわかる。

ボールに作用させる力積を大きくするための方策を，水平面上でバットとボールが直角に衝突するという単純なモデルで考える (図 1-2 : 平野 1992)。

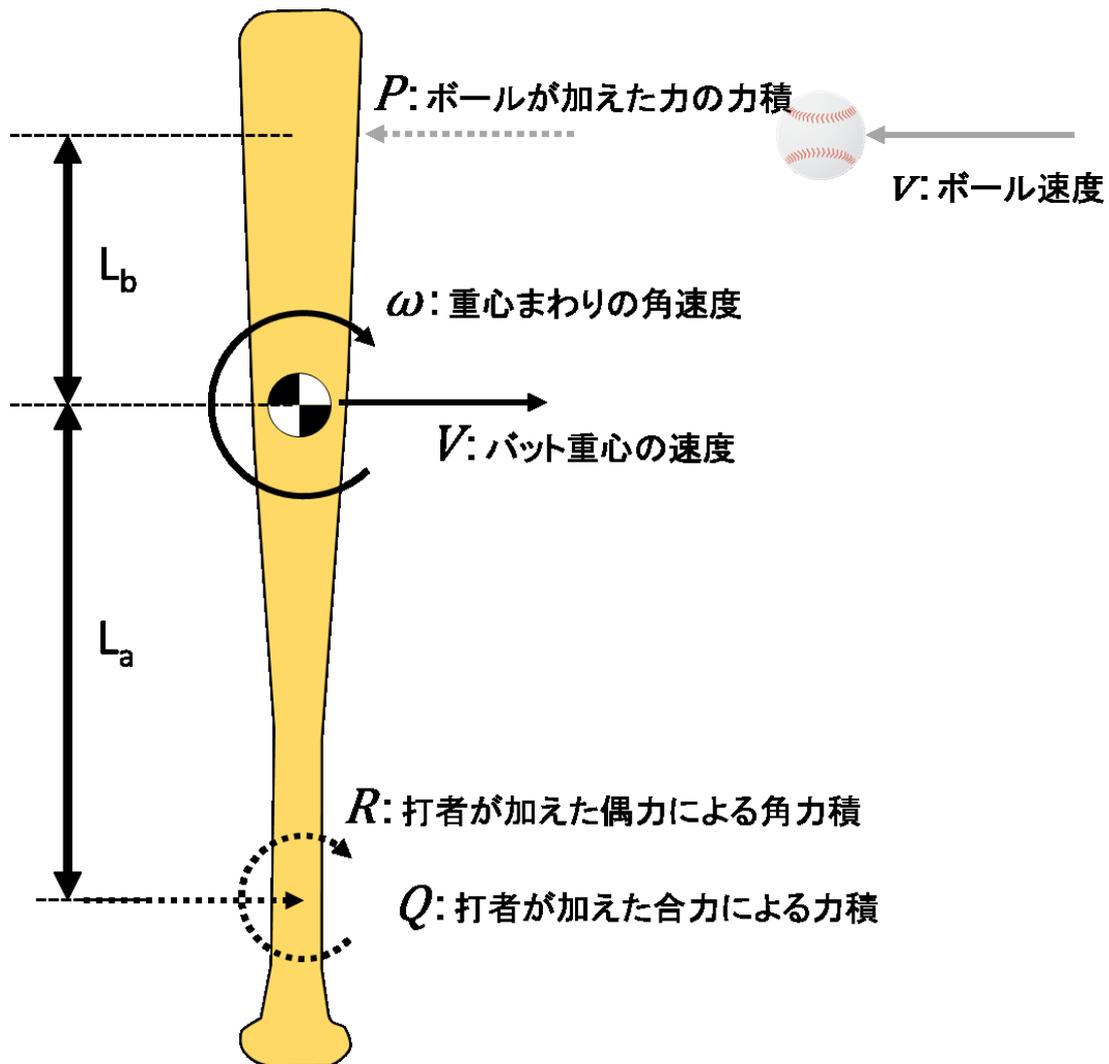


図 1-2 2次元平面上でのバットとボールのインパクト. 平野(1992)から引用.

打者がグリップに作用させる力系を 1 つの合力と 1 つの偶力に単純化すると、インパクト時にバットには、打者の両手部がグリップに加えた合力の力積 ( $Q$ ) と打者の手部がグリップに加えた偶力によるバット重心まわりの角力積 ( $R$ ) が作用するとみなすことができる。また、インパクト位置には、インパクトによりボールがバットに加えた力の力積 ( $P$ ) がボールから作用する。並進運動と回転運動それぞれで、力積と運動量の変化の関係について記すと、以下の 2 つの式が得られる。

$$Q - P = M(V_1 - V_0)$$

(式 1-2)

$$R - L_a Q - L_b P = I_G(\omega_1 - \omega_0)$$

(式 1-3)

$M$ はバットの質量,  $V$ はバットの重心速度,  $L_a$ はバット重心からグリップまでの距離,  $L_b$ はバット重心からインパクト位置までの距離,  $I_G$ はバットの重心まわりの慣性モーメント,  $\omega$ はバット重心まわりの角速度を示している. また, インパクト前後は下付きの数字を用いて示し, 0がインパクト直前を, 1がインパクト直後をそれぞれ示している. また, ボールに作用する力積は以下のように表される.

$$P = m(v_1 - v_0)$$

(式 1-4)

式 1-4 を式 1-2 と式 1-3 に代入すると,

$$Q = M(V_1 - V_0) + m(v_1 - v_0)$$

(式 1-5)

$$R = I_G(\omega_1 - \omega_0) + L_a M(V_1 - V_0) + (L_a + L_b)m(v_1 - v_0)$$

(式 1-6)

となる. 一方で, バットとボールの反発係数 ( $e$ ) は, 打撃位置からみたそれぞれの物体の速度の変化率で表すことができるので, 以下の式となる.

$$v_1 - (V_1 + L_b \omega_1) = -e\{v_0 - (V_0 + L_b \omega_0)\}$$

(式 1-7)

式 1-4~式 1-7 をまとめると, ボールに作用する力積は次の式で表すことができる.

$$P = \frac{(1+e)(V_0 + L_b\omega_0 - v_0) + (1/M - L_aL_b/I_G)Q + L_bR/I_G}{(1/m + 1/M + L_b^2/I_G)}$$

(式 1-8)

この式をもとに考えると、打者が変化させることができる要因は道具による要因を除くと、バットに作用させる力積 ( $Q$ )・角力積 ( $R$ )、およびインパクト位置の速度 ( $V_0 + L_b\omega_0$ ) である。バットとボールの接触時間 ( $t_I - t_0$ ) が非常にわずかであること (Nathan 2000) や、ボールとバットの衝突による力の力積と比較して打者がバットに加えることのできる力積や角力積は無視できるほど小さいものであることを考慮すると、打球速度を大きくするために打者が取り組むべき課題は、バットがボールにインパクトするまでの間にバットの速度 (とりわけ、バットの芯付近の速度) を可能な限り大きくしておくことに集約されることになる。

実際の打撃では、ボールがバットの芯付近でインパクトされるとは限らず、インパクト位置は各打撃によって異なるため、各打者のバットの速さを表す指標としては、バットのヘッドスピードが用いられている。前述したモデルは理論値であるため、実際の打撃についてみると、ヘッドスピードが大きい打撃ほど、打球の速度やその運動エネルギーが大きいこと (城所ら 2011) が報告されている。またヘッドスピードと打球飛距離の関係をみると、ヘッドスピードが大きい打撃ほど、打球の飛距離が大きく (城所ら 2011)、実際の試合を撮影した森下ら (2012) の報告では、単打に比べて打球飛距離の大きい長打が放たれた時ほどヘッドスピードが大きかったことが示されている。また、様々な条件を統一し、ある一つの変数を変化させることで、各要素の効果を検証できるシミュレーション研究では、ヘッドスピードが 1m/s 大きくなることによって飛距離が 5m 伸びること (Sawicki et al. 2003) も報告されている。これらより、ヘッドスピードを高めることは野球の打撃にとって重要であり、ヘッドスピードをいかに高めるかという観点で研究が行われてきた。

バットのヘッドスピードは、バット重心の曲線運動速度と重心まわりのバット長軸の回

転速度によって決定する。インパクト時のグリップエンドの並進速度やバットを含めた打者全体の重心の速度は非常に小さい (平野 1984, 矢内 2007) ため、バット長軸の回転速度を高めることが重要である。インパクト時のバットの速度を生じさせる力学的な要因を、矢内 (2007) は Deterministic model (Hay and Reid 1982) を用いて説明しており、バットを含めた打者全体が獲得する回転は地面反力によって得られたモーメントによって生じることを示している。打者の両足に作用する地面反力は偶力のように作用し、重心を通る鉛直軸まわりの回転を生じさせる (小田ら 1991, Yanai 2007)。この鉛直軸まわりの回転が体幹から上肢、バットへと伝達することによってバット長軸の回転を生じさせている (宮西 2006)。この体幹から上肢という回転の伝達は多くの研究で観察されている。Shaffer et al. (1993) は下肢から体幹、上肢へ順にそれぞれの筋が活動していることを報告している。また、下腕の回転から上腕の回転、そして肘関節の回転というように遠位になるほど回転速度の最大値が大きく、より遅れてその最大値が出現していたことが報告されている (Welch et al. 1995, 田内ら 2005)。これらの研究結果によって、打撃動作はバットの末端 (バットヘッド) を効率的に加速させるために、近位のセグメントから遠位のセグメントへ速度が大きくなるという順次的な運動 (Putnam 1993) であることが示されてきた。さらに、シーズン中の打率が高い打者ほど肘関節の伸展角速度や下腕の回旋速度が速いことも示されており (Inkster et al. 2011)、連動的な運動に加え、体幹や上肢といった各セグメントの相対的な速さが重要であり、これらのセグメントに関連する筋の強化が必要であることが示唆されてきた。また、Szymanski et al. (2007) は実際に下腕や上腕の回転速度を高めるトレーニングを行うことによって、バットのヘッドスピードが向上することを示した。しかしながら、これらの研究はキネマティック的なデータを指標としているため、体幹や上肢がどのようにバットのヘッドスピードの獲得に貢献し、どのようにそれを高めているかという原因・結果の解明には至っていない。

バットは両手で握られており、閉ループ機構を構成し、左右各手がどのようにバットの運

動を生じさせるかを明らかにすることは困難であった。

Cross (2006) は、バットに作用する合力と合モーメント、およびバットと両手の姿勢から、左右各手がバットに作用させる力とモーメントを推定した。また近年では、バットのグリップに直接センサを埋め込むことによって、両手が作用させる力とモーメントを計測できる手法が開発され、バットには左右各手からバットを引っ張る方向 (バットヘッドからグリップエンドへ向かう方向) へ大きな力が加えられており、バット長軸に直交する力は偶力のよ

うに作用し、バットを角加速させていることが明らかとなっている (Koike et al. 2004)。さらに、小池ら (2009) はバットに作用した力・モーメントからバットのヘッドスピード生成に貢献する要因を算出し、引手 (右打者の左手) の肩関節のトルクや運動依存によって生じるモーメントが大きく貢献していることを示した。このようにバットに作用する力を直接計測する手法によって、どのようにヘッドスピードが獲得されているかが明らかとなってき

た。

## 2.2 打球の飛翔角度、および回転数と飛距離との関係

飛距離が大きい打球を放つためには、インパクトまでにバットヘッドを加速させ、大きなバットヘッド速度でボールをインパクトし、大きな打球速度を獲得することに加え、適切な角度で打球を飛翔させる必要がある。打球の飛翔角度は、2次元のモデルで見た場合、インパクト時のバット速度ベクトルと衝撃線角度 (バット中心とボール中心を結んだ線と水平線のなす角度) によって決定される。衝撃線の正弦成分はアンダーカット距離と称される (Sawicki et al 2003)。この距離が大きいほど打球速度がわずかに小さくなるものの、打球の飛翔角度が大きくなる。しかしながら、飛翔角度が大きいとポップフライや内野フライといった滞空時間が長く、飛距離が小さい打球となってしまう。打球の回転による影響を無視した (回転数=0) 場合、飛翔角度が 35°程度で最も打球の飛距離が大きくなるとされている (Watts and Bahill 2002)。打球は回転することによって、マグヌス効果の影響を受け、打球の

速度と回転軸に直交する方向へ揚力が作用する。つまり、打球の飛距離は打球の回転の影響も受ける。バックスピン方向に打球の回転数が多くなるほど、マグヌス効果の影響が大きくなるため、打球の発射速度や飛翔角度が同一であっても飛距離がより伸びると考えられている (Watts and Bahill 2002)。これは打球の回転数を大きくすることによって、打球の飛翔角度が小さくても飛距離の大きい打球を放つことができることを示唆するものである。打撃のシミュレーションでは、打球の飛翔角度が  $5^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ の間では、打球の回転数が大きくなることによって、その発射角度が小さくなるものの、打球の飛距離が大きくなることが示されている (Watts and Bahill 2002)。打球の回転数を増加させる方法の一つとして、アンダーカット距離を大きくすることが挙げられる (Watts and Bahill 2002, Cross and Nathan 2006)。しかし、アンダーカット距離を極端に大きくする (3cm 以上になる) ことは、前述したように飛翔角度が大きくなってしまい、飛翔高の高いフライや打席の後方へ飛翔するファウルチップになる可能性が高まり、打撃方向への飛距離を獲得する上ではマイナスとなる。さらに、飛翔角度が大きくなると、バックスピン方向に回転数が多い打球でも、回転数が少ない打球と同程度の飛距離しか獲得できないことが報告されている (Nathan 2008)。アンダーカット距離は数 mm の違いが打球の発射角度に大きく影響するため、高速なボールとバットを衝突させる打撃では技術的な要因が大きく、調節が困難であると考えられる。アンダーカット距離の調節以外の方法によって飛翔角度を大きくすることなく、高回転の打球を放つことができれば、大きな飛距離を獲得することができると考えられる。

インパクト時にボールに作用する力は、ボールの法線方向 (撃力) と接線方向 (摩擦力) へと分解することができる。アンダーカット距離が大きい打撃が、アンダーカット距離が小さい打撃よりも多くの回転が打球にかかるのは、ボールに作用する摩擦力の成分が大きくなるためである。つまり、ボールに作用する摩擦力の大小によって打球の回転数は変化する。摩擦力が大きければ、打球により多くの回転をかけることができると考えられる。バットが長軸まわりに回転していない場合とバットが長軸まわりに回転している (ローリングして

いる) 場合を比較すると、バットがローリングしていると摩擦力は大きくなり、さらにローリングの回転速度が大きければ大きいほど、摩擦力が大きくなる。すなわち、バットのローリングは打球に回転を与える一つの要因であり、ローリングを高めることで飛翔角度が低く、かつ高回転数の打球が放つことができると考えられる。バットのローリングは、打者自身のスイングによって変化させ得るものであると考えられるため、ローリングの回転速度を高めることは、アンダーカット距離による技術的な調節よりも効率的に打球に多くの回転を与えることができると推察される。

### 2.3 野球の打撃におけるバットのローリング

先述したように野球の打撃において、バットをローリングさせることによって、打球にバックスピン方向の回転を与えることができ、打球の飛距離を大きくすることができると考えられる。ローリングの効果を、Sawicki et al. (2003) は2次元剛体モデルを用いたシミュレーション法を用いて打球にどのような影響を与えるかを検証した。この研究によると、インパクト時のローリングの回転速度（ローリング角速度）が大きいほど、打球の回転数が大きくなり、その飛距離が伸びることが示されている。また、城所ら (2011) は打者が実際に打撃している際のローリング角速度を計測し、その効果について検証した。実際の打撃におけるローリング角速度はインパクト時に  $1700^\circ/\text{s}$  まで達していた。さらに、ローリング角速度の大きさは打球の飛距離とは関連がなかったものの、ローリング角速度が大きい打撃ほど、打球の運動エネルギーが大きくなると報告している。Sawicki et al. (2003) が用いたモデルでは、剛体モデルが使用されていることに加え、モデルの妥当性が検証されていないため、分析結果が実際の打撃の特徴を正確に反映するものかは疑問である。城所ら (2011) は、ローリング角速度の大きさと打球飛距離に関連がみられなかったという実測データを示したうえで、この結果について、大きなローリング角速度を有したバットでのインパクトは衝撃力とローリングによる摩擦力の合力がボールに作用するため、ローリングしていない場合

よりもボールに作用する力は大きくなるが、その方向が下方へ向くため打球の発射角度は小さくなり、打球の回転による飛距離増加を相殺し、飛距離の増加がわずかなものであったと考察している。志村ら (2012) は 3 次元弾性モデルを用いたシミュレーション法を用いてローリングの効果を抽出することに試み、ローリング角速度が大きくなることによって、打球の回転速度は大きくなり、同じ飛距離の打球でも、低い弾道で短い時間で打球が飛翔することに加え、同じ飛翔角度で飛翔した場合には、約 0.9m 距離が伸びることを報告している。0.9m はわずかな距離であるものの、「野手が捕球できるかできないか」という紙一重を争う局面において、この飛距離の差の意味合いは大きいものになると考えられる。バットのローリングに関するこれらの知見をまとめると、ローリング角速度を高めることによって、打者のパフォーマンスを向上させることができると考えられる。

## 2.4 物体の 3 次元回転運動

バットのローリングはバット長軸まわりの回転運動であるため、バットの運動をラインセグメントの一般運動としてモデル化するのではなく、バットの運動を 3 次元的な剛体の運動として捉える必要がある。物体の 3 次元回転運動の力学原理をバット運動の解析に応用することによりローリングの発生メカニズムを紐解くことにする。なお、この節で用いる数式において、 $3 \times 1$  のベクトルは**太字**で、スカラーは*斜体*で、 $3 \times 3$  の行列は**太字**かつ*斜体*で記した。

### 2.4.1 移動座標系におけるベクトルの変化率 (Hibbeler 2013)

3 次元の回転運動を観察・計測するためには、ベクトルの時間微分について理解しておく必要がある。ある物体の角速度ベクトルは、その物体の運動を表すために選ばれた座標系の各軸の成分によって規定される。角速度ベクトルを時間微分する場合、その角速度ベクトルのすべての成分ではなく、1 つないし 2 つの成分で単純化された回転で表されるような座標

系を用いることによって、より簡便に角速度ベクトルを時間微分することができる。この方法は角速度ベクトルのみならず、どのベクトルにおいても適用できる。そこで、あるベクトル  $\mathbf{A}$  の時間微分について、移動座標系と静止座標系の間に成り立つ関係を以下に記す。

$O$  を原点とする 2 つの座標系について考える。1 つは静止座標系 ( $O$ -XYZ) であり、もう一方は、ある瞬間に  $\boldsymbol{\Omega}$  で回転する移動座標系 ( $o$ -xyz) である。まず、ベクトル  $\mathbf{A}$  を静止座標系について表すと、

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k} \quad (\text{式 1-9})$$

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  は静止座標系における移動座標系の各軸の方向を示す単位ベクトルである。  $A_x, A_y, A_z$  は移動座標系における各軸の成分を示している。移動座標系に固定された観測者から見たベクトル  $\mathbf{A}$  の変化や変化率を静止座標系について表すために、移動座標系について表されたベクトル  $\mathbf{A}$  の各成分 ( $A_x, A_y, A_z$ ) を時間微分すると以下のようにして表すことができる。

$$(\dot{\mathbf{A}})_{\text{oxyz}} = \dot{A}_x \mathbf{i} + \dot{A}_y \mathbf{j} + \dot{A}_z \mathbf{k} \quad (\text{式 1-10})$$

右辺の各項 ( $\dot{A}_x, \dot{A}_y, \dot{A}_z$ ) は、移動座標系における各成分の時間微分を示している。これを静止座標系に固定された観測者から見たベクトル  $\mathbf{A}$  の変化や変化率として表すためには、ベクトルの大きさが一定であるとしたときに移動座標系の各軸の向きが回転によって変化することを考慮する必要がある。

$$\dot{\mathbf{A}} = \dot{A}_x \mathbf{i} + \dot{A}_y \mathbf{j} + \dot{A}_z \mathbf{k} + A_x \frac{d}{dt} \mathbf{i} + A_y \frac{d}{dt} \mathbf{j} + A_z \frac{d}{dt} \mathbf{k} \quad (\text{式 1-11})$$

式 1-11 における右辺の第 1～3 項は、移動座標系に固定された観測者から見たベクトルの変化を、第 4～6 項は、静止座標系に固定された観測者から見た移動座標系の方位変化による

ベクトルの変化をそれぞれ示す。各軸のベクトルの微小な変化は、回転軸と各軸がなす平面に直交する方向へ生じるため、各軸の時間微分は移動座標系の回転を表す角速度ベクトルと各軸の単位ベクトルとの外積によって得られる。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{i} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{i} \quad \frac{d}{dt}\mathbf{j} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{j} \quad \frac{d}{dt}\mathbf{k} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{k} \quad (\text{式 1-12})$$

これらを式 1-11 に代入することによって、静止座標系について表されるベクトルの変化率を以下のように表すことができる。

$$\dot{\mathbf{A}} = (\dot{\mathbf{A}})_{\text{xyz}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{A} \quad (\text{式 1-13})$$

このようにベクトルの変化は、移動座標系に固定された観測者からみた各軸成分が変化することによるベクトルの変化（右辺の 1 項目）に加えて、移動座標系に固定された観測者からみたベクトルの大きさや方向自体は変化せずとも、移動座標系そのものが回転することによって、各軸の方向が変化することによって生じるベクトルの変化（右辺の 2 項目）の和によって表すことができる。3 次元的に回転する物体の運動方程式を解くためには、このベクトルの変化を表す式 1-13 を用いる。

#### 2.4.2 物体の角運動量 (Hibbeler 2013)

様々な剛体の回転運動を捉える際には、剛体の角運動量について理解しておく必要がある。そこで本節では、ある任意の点まわりの剛体の角運動量について記述する。以下に示す式は、力積-運動量の関係や剛体の回転運動の方程式を応用し、質点の角運動量から剛体の角運動量を算出するものである。ある剛体を構成する要素となる質量  $m$  の質点  $i$  を考える。X, Y, Z からなる慣性座標系について、ある任意の点 (B) まわりの角運動量を算出する。ある任意の点まわりの質点の角運動量は以下のように表すことができる。

$$(\mathbf{H}_B)_i = \boldsymbol{\rho}_i \times m_i \mathbf{v}_i \quad (\text{式 1-14})$$

ここでは、 $\boldsymbol{\rho}_i$ が点 B から質点までの位置ベクトルを、 $\mathbf{v}_i$ が慣性座標系から計測された質点の速度ベクトルをそれぞれ表している。質点の位置および速度をその質点が含まれる剛体の質量中心 G を用いて表すと、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_i &= \boldsymbol{\rho}_G + \boldsymbol{\rho}_{i/G} \\ \mathbf{v}_i &= \mathbf{v}_G + \mathbf{v}_{i/G} \end{aligned} \quad (\text{式 1-15})$$

$\boldsymbol{\rho}_G$ と $\mathbf{v}_G$ はそれぞれ点 B から質量中心までの位置と質量中心の速度を、 $\boldsymbol{\rho}_{i/G}$ と $\mathbf{v}_{i/G}$ はそれぞれ質量中心に対する質点の位置および速度を示している。

式 1-15 を用いて式 1-14 を表すと、

$$(\mathbf{H}_B)_i = (\boldsymbol{\rho}_G + \boldsymbol{\rho}_{i/G}) \times m_i (\mathbf{v}_G + \mathbf{v}_{i/G}) \quad (\text{式 1-16})$$

この剛体が多数の質点で構成されているとすると、すべての質点の角運動量を合算することによって、剛体の角運動量を算出することができる。

$$\begin{aligned} \sum (\mathbf{H}_B)_i &= \sum [(\boldsymbol{\rho}_G + \boldsymbol{\rho}_{i/G}) \times m_i (\mathbf{v}_G + \mathbf{v}_{i/G})] \\ &= \boldsymbol{\rho}_G \times \left( \sum m_i \right) \mathbf{v}_G + \sum (m_i \boldsymbol{\rho}_{i/G}) \times \mathbf{v}_G + \boldsymbol{\rho}_G \times \sum (m_i \mathbf{v}_{i/G}) + \sum (\boldsymbol{\rho}_{i/G} \times m_i \mathbf{v}_{i/G}) \end{aligned} \quad (\text{式 1-17})$$

$\sum (m_i \boldsymbol{\rho}_{i/G})$  は、剛体の質量中心に対する質量中心の位置を表すので 0 となる。また剛体であるため、質量中心に対する各質点の運動量の和は 0 となる。質量中心に対する質点の速度をこの剛体の角速度 ( $\boldsymbol{\omega}$ ) を用いて ( $\mathbf{v}_{i/G} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_{i/G}$ ) 表し、式 1-17 をまとめると、

$$\mathbf{H}_B = \boldsymbol{\rho}_G \times m\mathbf{v}_G + \sum m_i [\boldsymbol{\rho}_{i/G} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_{i/G})]$$

(式 1-18)

式 1-18 の第 2 項を歪対称行列を用いて表すと、

$$\sum m_i (\tilde{\boldsymbol{\rho}}_{i/G} \tilde{\boldsymbol{\omega}} \boldsymbol{\rho}_{i/G}) = - \sum m_i (\tilde{\boldsymbol{\rho}}_{i/G} \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{i/G}) \boldsymbol{\omega}$$

(式 1-19)

$-\sum m_i (\tilde{\boldsymbol{\rho}}_{i/G} \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{i/G})$  は慣性テンソルを表すので、第 2 項は剛体の重心まわりの角運動量 ( $\mathbf{I}_G \boldsymbol{\omega}$ ) となる。すなわち、ある点まわりの角運動量は、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{H}_B = \boldsymbol{\rho}_G \times m\mathbf{v}_G + \mathbf{H}_G$$

(式 1-20)

この式の右辺は、2つの項から成り立っており、第 1 項は質量中心が並進運動をすることによって生じる B まわりの角運動量で、第 2 項は質量中心まわりの角運動量を表している。

角運動量を直交座標系の各成分として表す場合、慣性座標系に対して任意の方向をもつ座標系 (x, y, z) について表すのが有効である。剛体が並進運動をしておらず、重心まわりに回転しているとすると、角運動量は式 1-18 の右辺の第 2 項を用いて、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{H}_G = \sum m_i [\boldsymbol{\rho}_{i/G} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_{i/G})]$$

(式 1-21)

物体の角運動量，重心に対する質点の位置を表すベクトルおよび角速度ベクトルを  $x, y, z$  の成分として表すと，

$$H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j} + H_z \mathbf{k} = \sum m_i \{ (x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}) \times [(\omega_x \mathbf{i} + \omega_y \mathbf{j} + \omega_z \mathbf{k}) \times (x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k})] \}$$

(式 1-22)

この式を外積・展開することによって以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j} + H_z \mathbf{k} &= \left[ \omega_x \sum m_i (y^2 + z^2) - \omega_y \sum m_i xy - \omega_z \sum m_i xz \right] \mathbf{i} \\ &+ \left[ -\omega_x \sum m_i xy + \omega_y \sum m_i (x^2 + z^2) - \omega_z \sum m_i yz \right] \mathbf{j} \\ &+ \left[ -\omega_x \sum m_i zx - \omega_y \sum m_i yz + \omega_z \sum m_i (x^2 + y^2) \right] \mathbf{k} \end{aligned}$$

(式 1-23)

右辺に示された各積分式によって得られる値は慣性モーメントや慣性乗積を表している．

すなわち，角運動量の各成分は以下のようなになる．

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z \\ -I_{yx}\omega_x + I_{yy}\omega_y - I_{yz}\omega_z \\ -I_{zx}\omega_x - I_{zy}\omega_y + I_{zz}\omega_z \end{bmatrix}$$

(式 1-24)

仮に座標系  $(x, y, z)$  が，物体の慣性主軸と一致している場合，慣性乗積は 0 となるので，

式 1-24 はより単純化できる．

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\omega_x \\ I_{yy}\omega_y \\ I_{zz}\omega_z \end{bmatrix}$$

(式 1-25)

### 2.4.3 オイラーの運動方程式

物体に作用するすべての力がある点 (P) まわりに生み出すモーメントの和 (合モーメント) は, その物体が有するその点 (P) まわりの角運動量の変化と同値である.

$$\sum \mathbf{M}_P = \dot{\mathbf{H}}_P$$

(式 1-26)

この関係は, 物体の重心まわりの運動についても同様である. 物体を構成する各質点の運動について考える. 各質点が有する物体の質量中心まわりの角運動量を, 物体の質量中心に原点を有する回転しない移動座標系について表すと, 以下のようになる.

$$(\mathbf{H}_i)_G = \mathbf{r}_{i/G} \times m_i \mathbf{v}_{i/G}$$

(式 1-27)

左辺は質量中心まわりの質点 i の角運動量を示しており,  $\mathbf{r}_{i/G}$  は質量中心に対する質点の位置を表すベクトル,  $m_i$  は質点の質量,  $\mathbf{v}_{i/G}$  は重心に対する質点の速度を示している. この時の角運動量の単位時間当たりの変化率を表すと,

$$(\dot{\mathbf{H}}_i)_G = \dot{\mathbf{r}}_{i/G} \times m_i \mathbf{v}_{i/G} + \mathbf{r}_{i/G} \times m_i \dot{\mathbf{v}}_{i/G}$$

(式 1-28)

となる. ここで  $\dot{\mathbf{r}}_{i/G} = \mathbf{v}_{i/G}$  となるため, 右辺の 1 項目は 0 となる. そして, 2 項目においては  $\dot{\mathbf{v}}_{i/G} = \mathbf{a}_{i/G}$  となる. すなわち, 各質点の角運動量の時間変化は以下の式で表すことができる.

$$(\dot{\mathbf{H}}_i)_G = \mathbf{r}_{i/G} \times m_i \mathbf{a}_{i/G}$$

(式 1-29)

物体の質量中心まわりの角運動量はこれらの総和となるため、

$$\dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{G}} = \sum (\mathbf{r}_{i/\mathbf{G}} \times m_i \mathbf{a}_{i/\mathbf{G}})$$

(式 1-30)

と表すことができる。  $\mathbf{a}_{i/\mathbf{G}}$  は質量中心に対する各質点の相対加速度であるため、  $\mathbf{a}_{i/\mathbf{G}} = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{\mathbf{G}}$  と表すことができる。  $\mathbf{a}_i$  は質点の加速度を、  $\mathbf{a}_{\mathbf{G}}$  は質量中心の加速度を表している。これを式 1-30 に代入すると、

$$\dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{G}} = \sum (\mathbf{r}_{i/\mathbf{G}} \times m_i \mathbf{a}_i) - \sum (\mathbf{r}_{i/\mathbf{G}} m_i) \times \mathbf{a}_{\mathbf{G}}$$

(式 1-31)

右辺の 2 項目は質量中心を表すため 0 となる。また、  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  から、  $m_i \mathbf{a}_i$  は各質点に作用する外力を表している。これらより質量中心まわりの合モーメントは質量中心まわりの角運動量の変化と同値となる。

$$\sum \mathbf{M}_{\mathbf{G}} = \dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{G}}$$

(式 1-32)

上式は、物体の重心に原点を持つ回転しない移動座標系について表されたものである。角運動量の各軸の成分は式 1-24 や式 1-25 によって定義される。これらの成分を原点が同一で回転する座標系について計算する場合、各軸の回転を考慮しなければならない。角速度 ( $\boldsymbol{\Omega}$ ) で回転する移動座標系について角運動量の変化を表すと、前節で示したベクトルの変化率 (式 1-13) を応用すると式 1-32 は以下のようなになる。

$$\sum \mathbf{M}_{\mathbf{G}} = (\dot{\mathbf{H}}_{\mathbf{G}})_{\text{xyz}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H}_{\mathbf{G}}$$

(式 1-33)

式 1-33 は、回転する移動座標系について表されたものである。この式をもとに考えると、ある物体に作用するモーメントの総和は、移動座標系に固定された観測者からみた物体の

角運動量の変化と、静止した観測者からみた移動座標系の回転によって説明しうる物体の角運動量の変化の和によって表される。

この運動方程式は、それぞれの物体の運動に合わせて計算を単純化するために、移動座標系を3つの選択肢の中から選ぶことができる。まず移動座標系が回転していない場合 ( $\boldsymbol{\Omega} = 0$ )、運動方程式の2項目は0となるため、 $\sum \mathbf{M}_G = (\dot{\mathbf{H}}_G)_{oxyz}$  と式を単純化することができる。しかしながら、その物体の慣性モーメントや慣性乗積は移動座標系に対して時々刻々と変化することに注意しなければならない。次に移動座標系が物体に固定されて、ともに移動・回転する場合 ( $\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\omega}$ )、物体の慣性モーメントや慣性乗積は常に一定である。そのため、

$$\sum \mathbf{M}_G = (\dot{\mathbf{H}}_G)_{oxyz} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}_G \quad (\text{式 1-34})$$

と表すことができる。これを各成分について表すと、

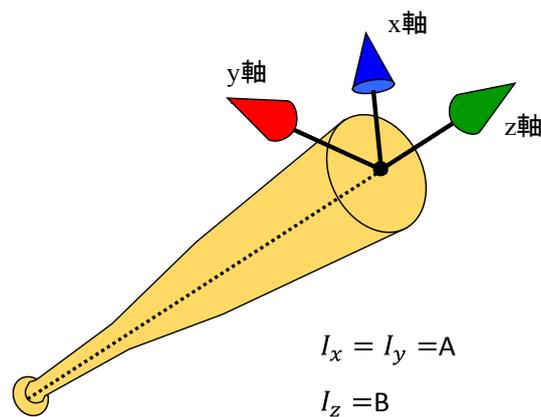
$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\dot{\omega}_x - (I_{yy} - I_{zz})\omega_y\omega_z - I_{xy}(\dot{\omega}_y - \omega_z\omega_x) - I_{yz}(\omega_y^2 - \omega_z^2) - I_{zx}(\dot{\omega}_z + \omega_x\omega_y) \\ I_{yy}\dot{\omega}_y - (I_{zz} - I_{xx})\omega_z\omega_x - I_{yz}(\dot{\omega}_z - \omega_x\omega_y) - I_{zx}(\omega_z^2 - \omega_x^2) - I_{xy}(\dot{\omega}_x + \omega_y\omega_z) \\ I_{zz}\dot{\omega}_z - (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_y - I_{zx}(\dot{\omega}_x - \omega_y\omega_z) - I_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2) - I_{yz}(\dot{\omega}_y + \omega_z\omega_x) \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-35})$$

となる。さらに移動座標系の各軸が慣性主軸と一致する場合、慣性乗積は0となるので、シンプルな式で物体に作用するモーメントの各成分を示すことができる。

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x\dot{\omega}_x + (I_y - I_z)\omega_y\omega_z \\ I_y\dot{\omega}_y + (I_z - I_x)\omega_z\omega_x \\ I_z\dot{\omega}_z + (I_x - I_y)\omega_x\omega_y \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-36})$$

これはオイラーの運動方程式として知られているものである。そして、コマのような軸対称な物体に移動座標系が固定されている場合、自転軸のみ回転しない座標系を選ぶことによって、その回転を単純化することができる ( $\boldsymbol{\Omega} \neq \boldsymbol{\omega}$ )。しかしながら、軸対称である物体は、

自転軸以外の慣性モーメントが同値であるため、移動座標系における角運動量の変化が合モーメントを表すこととなる。バットを例に挙げると、バット長軸を z 軸として、x 軸、y 軸をバット長軸に直交する面上に存在し、互いに直交する軸とすると（図 1-3）、バットの短軸まわりの慣性モーメント ( $I_x = I_y$ ) は同値であるため、式 1-36 の右辺 3 行目の 2 項目が 0 となる。



**図 1-3 バットに固定された座標系とバットの主慣性モーメント。軸対称の物体であるため、短軸まわりの慣性モーメントは同値 (A) であり、長軸まわりの慣性モーメント (B) が短軸まわりのものと異なる値である。**

そのため、バットのような回転している軸対称物体の角運動量の変化は、角運動量ベクトル自体の大きさの変化と、角運動量ベクトルの大きさが変わらずとも移動座標系の回転によって各軸の方向が変わることによる変化を識別することができない。そこで、軸対称の物体の角速度をオイラー角を用いて表すことによって、その問題を解決する。

#### 2.4.4 ジャイロスコーピックモーション

ある瞬間の物体の方位は、オイラー角を用いて表すことができる。オイラー角とは、2つの直交座標系の相対的な方位関係を表す方法の一つであり、ある基準となる座標系から物体に固定された座標系の方位を表す3つの連続した角度である。それぞれの角度の時間微分は歳差運動、章動、自転として表される。これらの角度の時間微分を用いて物体の角速度を表す手順を示す(図1-4: Andrews 1995)。ある基準となる座標系  $R_G (\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K})$  と同じ向きの仮想座標系  $R_1 (\mathbf{i}_1, \mathbf{j}_1, \mathbf{k}_1)$  を考える。2つの座標系は同じ原点を持っているとすると、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{i}_1 = \mathbf{I} \quad \mathbf{j}_1 = \mathbf{J} \quad \mathbf{k}_1 = \mathbf{K}$$

まず、 $\mathbf{k}_1$ まわりに $\theta$ 回転した場合、回転後の仮想座標系を  $R_2 (\mathbf{i}_2, \mathbf{j}_2, \mathbf{k}_2)$ と表すと、回転前後の座標系は回転角度を用いた回転行列 ( $A_{R_2/R_G}$ ) を用いることで同値となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{j}_1 \\ \mathbf{k}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{j}_2 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix}$$

(式 1-37)

また、その時の角度の時間微分は回転行列を時間微分することによって得られる。回転行列の時間微分は、その回転行列とその回転速度を表す歪対称行列の積と同値である。

$$\begin{aligned} \dot{A}_{R_2/R_G} &= A_{R_2/R_G} \tilde{\Omega}_{R_2/R_G} \\ A_{R_2/R_G}^T \dot{A}_{R_2/R_G} &= \tilde{\Omega}_{R_2/R_G} \\ \dot{\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\theta} & 0 \\ \dot{\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(式 1-38)

歪対称行列を  $3 \times 1$  のベクトルへ直すと、1回目の回転角度の時間微分は以下のようになる。

$$\boldsymbol{\Omega}_{R_2/R_6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-39})$$

次に、 $\mathbf{i}_2$ まわりに $\phi$ 回転した場合、回転後の仮想座標系を  $R_3(\mathbf{i}_3, \mathbf{j}_3, \mathbf{k}_3)$  と表すと、回転前後の座標系は回転角度を用いた回転行列 ( $A_{R_3/R_2}$ ) を用いることで同値となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{j}_2 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_3 \\ \mathbf{j}_3 \\ \mathbf{k}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-40})$$

また、式 1-38 と同様に回転行列を時間微分すると、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{A}_{R_3/R_2} &= A_{R_3/R_2} \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{R_3/R_2} \\ A_{R_3/R_2}^T \dot{A}_{R_3/R_2} &= \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{R_3/R_2} \\ \dot{\phi} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \phi & -\cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{\phi} \\ 0 & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{式 1-41})$$

歪対称行列を  $3 \times 1$  のベクトルへ直すと、2 回目の回転角度の時間微分は以下のようになる。

$$\boldsymbol{\Omega}_{R_3/R_2} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \mathbf{i}_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-42})$$

そして再び、 $\mathbf{k}_3$ まわりに $\phi$ 回転した場合、回転後の仮想座標系を  $R(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$  と表すと、回転

前後の座標系は回転角度を用いた回転行列 ( $A_{R/R_3}$ ) を用いることで同値となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_3 \\ \mathbf{j}_3 \\ \mathbf{k}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix}$$

(式 1-43)

また、式 1-38 と同様に回転行列を時間微分すると

$$\dot{A}_{R/R_3} = A_{R/R_3} \tilde{\Omega}_{R/R_3}$$

$$A_{R/R_3}^T \dot{A}_{R/R_3} = \tilde{\Omega}_{R/R_3}$$

$$\dot{\psi} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \psi & -\cos \psi & 0 \\ \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & 0 \\ \dot{\psi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(式 1-44)

歪対称行列を  $3 \times 1$  のベクトルへ直すと、3 回目の回転角度の時間微分は以下ようになる。

$$\Omega_{R/R_3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \mathbf{k} \end{bmatrix}$$

(式 1-45)

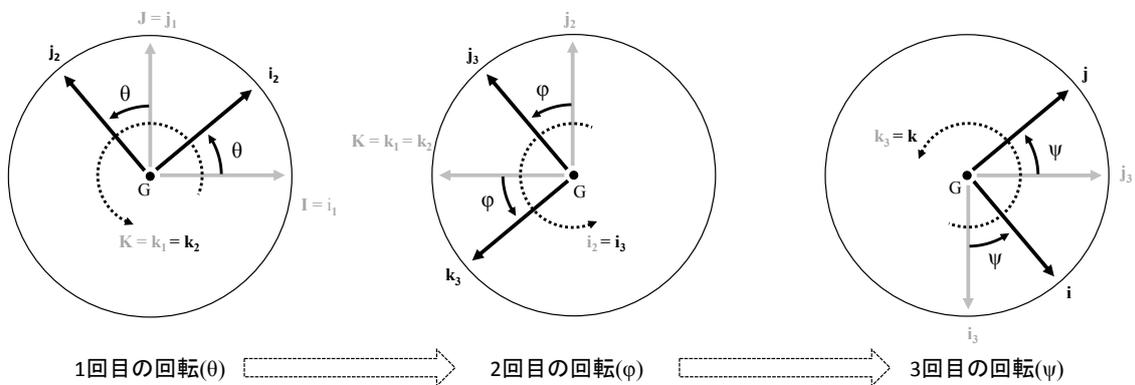


図 1-4 オイラー角. 1 回目の回転で  $k_1$  まわりに  $\theta$  回転し, 2 回目の回転で  $i_2$  まわりに  $\phi$  回転し, 3 回目の回転で  $k_3$  まわりに  $\psi$  回転する. Andrews (1995) から引用.

ゆえに物体の角速度 ( $\Omega$ ) は, 式 1-39, 1-42, 1-45 によって得られた角速度の和となる。

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega}_{R/R_G} = \boldsymbol{\Omega}_{R/R_3} + \boldsymbol{\Omega}_{R_3/R_2} + \boldsymbol{\Omega}_{R_2/R_G} = \dot{\psi}\mathbf{k} + \dot{\phi}\mathbf{i}_3 + \dot{\theta}\mathbf{k}_2 \quad (\text{式 1-46})$$

右辺の 3 つの項の座標系はそれぞれ異なるため、それぞれの角速度を移動座標系と一致させるように座標変換をすると、オイラー角を用いた物体の角速度は以下のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{(R/R_3)}^T \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{(R/R_3)}^T \mathbf{A}_{(R_3/R_2)}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \sin \varphi \sin \psi + \dot{\phi} \cos \psi \\ \dot{\theta} \sin \varphi \cos \psi - \dot{\phi} \sin \psi \\ \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-47})$$

上記の式によって得られた物体の角速度を用いてオイラーの運動方程式を表すと、以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \dot{\Omega}_x + (I_y - I_z) \Omega_y \Omega_z \\ I_y \dot{\Omega}_y + (I_z - I_x) \Omega_z \Omega_x \\ I_z \dot{\Omega}_z \end{bmatrix} \quad (\text{式 1-48})$$

これを前述したようにバットに応用すると (図 1-3), z 軸をバット長軸とし, それ以外を x 軸, y 軸とする. バットのローリング成分である z 軸まわりのモーメントの成分をみると

$$M_z = I_z \ddot{\psi} + I_z \ddot{\theta} \cos \varphi - I_z \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \varphi \quad (\text{式 1-49})$$

となり, z 軸まわりのモーメントは 3 つの項によって表すことができる. 式 1-49 をダランベールの原理を用いて表すと, 2 つのメカニズムによって構成されていることがわかる.

$$M_z + I_z \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin \varphi = I_z \ddot{\psi} + I_z \ddot{\theta} \cos \varphi$$

(式 1-50)

バット長軸まわりに角加速させるモーメントは、バット長軸まわりに作用するモーメントとバット長軸の向きが変化することによって生じるモーメント（慣性力）と同値である。1つ目のメカニズムは(式 1-50)の右辺によるバットを角加速させるモーメント、そして2つ目のメカニズムは左辺の2項目が示す角運動量の大きさと向きは変化せずに、バットの向きが変化することによって生じるモーメントである。このように軸対称であるバットの運動をオイラー角を用いて表すことによって、バット長軸まわりの運動を生じさせる2つのメカニズムを示すことが可能となる。

## 2.5 本研究との関連

これまでの研究では、打撃のパフォーマンスを向上させる手立てとして、バットのヘッドスピードをいかに高めるか、いかに正確にバットとボールをインパクトさせるかという観点で研究がなされてきた。近年になり、打撃パフォーマンスを向上させる新たなバットの運動として、バット長軸まわりの回転であるローリングの効果が検証されてきた。力学的にみれば、前述したように2つのメカニズムによってローリングが生じているのは明らかであるが、それら2つのメカニズムがバットのローリングに対してどのように貢献しているのか、またローリングを高めるためにはどのようにスイングすればよいのかという疑問の解明には至っていない。2つのメカニズムによる貢献を明らかにし、どのようにスイングすればローリングを高めることができるかを検証することができれば、打撃パフォーマンスを高めるための1つのアドバイスになりうると考えられる。

## 第2章 野球の打撃における上肢の捻り運動

### 1. はじめに

野球の打撃では、スイング開始直後からグリップエンドの並進運動とグリップエンドを中心としたバット長軸の回転運動に加えてバットが長軸まわりに回転する『ローリング』が観察されている(城所ら 2011, King et al. 2012). ローリングは、投手方向へバットが転がるような回転(トップスピン方向の回転)であり、大学野球選手を対象とした研究では、インパクト直前にその回転速度が $1700^{\circ}/s$ まで達することが報告されている(城所ら 2011). ローリングの回転速度(ローリング角速度)がトップスピン方向に大きい打撃ほど、打球の運動エネルギーが大きいこと(城所ら 2011)や打球の飛距離が伸びること(Sawicki et al. 2003), 同じ打球の飛距離の打球でも低い弾道で飛翔すること(志村ら 2012)が報告されている. これらの報告は、ローリング角速度を大きくすることによって、打者のパフォーマンスを向上させうることを示すものである.

Sawicki et al. (2003) は、ローリング角速度を大きくするようなスイングは不自然な動作となり、バットのヘッドスピードを低下させてしまい打者のパフォーマンスに対して負の影響が生じてしまうと懸念している. しかしながら、ローリングがどのような身体運動によって生じているのかは明らかとはなっていない. ローリングを生み出す身体運動は、肘関節が伸展し、バット長軸と上肢の長軸が平行または平行に近づいた場合に、上肢が長軸まわりに回転する運動であると推測される(図 2-1). 具体的には、肩関節の回旋や、川村ら(2001)が報告する引手(右打者の左手)の前腕回外と押手(右打者の右手)の前腕回内の協調運動であるリストターンであり、これらの運動によってローリングは生み出されていると考えられる. リストターンは「手首の返す」や「手首をこねる」というように指導現場で表現されている運動である. しかし、インパクト前後の手の甲の向きを実際に観察すると、押手の手の甲は下を向いているため、インパクト前にリストターンが生じているとは判断できな

い.

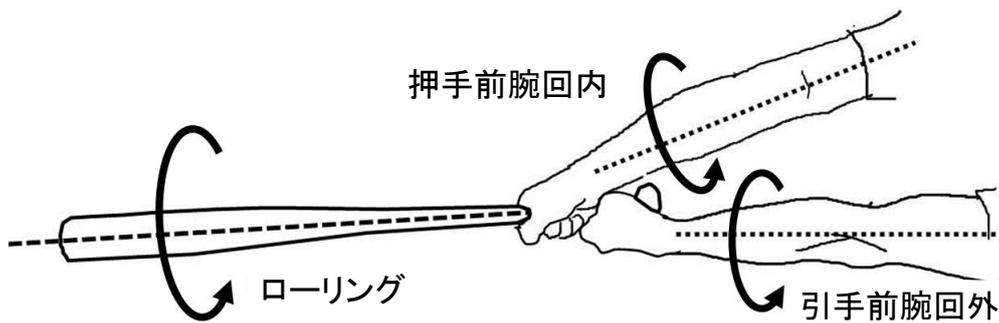


図 2-1 リストターン. 引手の前腕回外と押手の前腕回内によって構成される協調運動.

どのような上肢の運動がローリングに貢献するかを明らかにすることによって、ローリング角速度を大きくする方法を提案することができ、打者のパフォーマンスを向上させ得る知見を提供できるものと考えられる. そこで本研究では、実際の打撃における左右上肢の長軸まわりの運動を観察し、ローリングを生み出しうる動作であるリストターンがいつ生じているのかを明らかにし、リストターンがローリングを生み出しうる動作であるかを検討することを目的とした.

## 2. 方法

### 2.1 被験者

被験者は、東京六大学野球リーグに所属する選手 15 名 ( $19.9 \pm 1.4$  歳,  $1.74 \pm 0.03$  m,  $71.8 \pm 4.3$ kg) であった。このうち、右打者が 9 名、左打者が 6 名であった。本実験の実施にあたり、早稲田大学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。被験者には実験の趣旨・内容を十分に説明し、書面による実験参加の同意を得た。

### 2.2 データ収集

上肢とバットの運動は、電磁ゴニオメータ (LIBERTY, POLHEMUS 社製, Colchester, VT) を用いて 240Hz で計測した。電磁ゴニオメータは、コントロールユニットと磁場を発生させるトランスミッタ、磁場内でトランスミッタに対する位置・方位が計測できるセンサ、先端の位置を特定することのできるスタイラスによって構成されている。本研究では、身体を胸郭、左右上腕、左右前腕からなる 5 セグメントモデルとして定義し、これらのセグメントとバットの運動を計測するために、8 つのセンサを用いた。打撃中の各セグメントの運動を計測するために、バットや身体が触れないように打者の後方 30cm、高さ 90cm の位置にトランスミッタを設置した。それぞれのセンサは、胸骨、左右肩峰平坦部の皮膚上、左右前腕遠位部に両面テープおよびテーピングテープを用いて固定された。また、左右上腕部にはセンサが固定されたプラスチック製のカフを上腕遠位部に両面テープおよびテーピングテープで固定した。左右肩峰に固定されたセンサは、肩甲上腕関節の位置を推定する際に用いた。バットの運動を計測するために、硬式用木製バット (2TW-10455YT, ミズノ社製, 84cm, 928g) のグリップエンドにもセンサを装着した。インパクトの衝撃によるセンサへのダメージを防ぐため、厚さ 5mm の衝撃吸収パッドをバットとセンサの間に介した (図 2-2)。

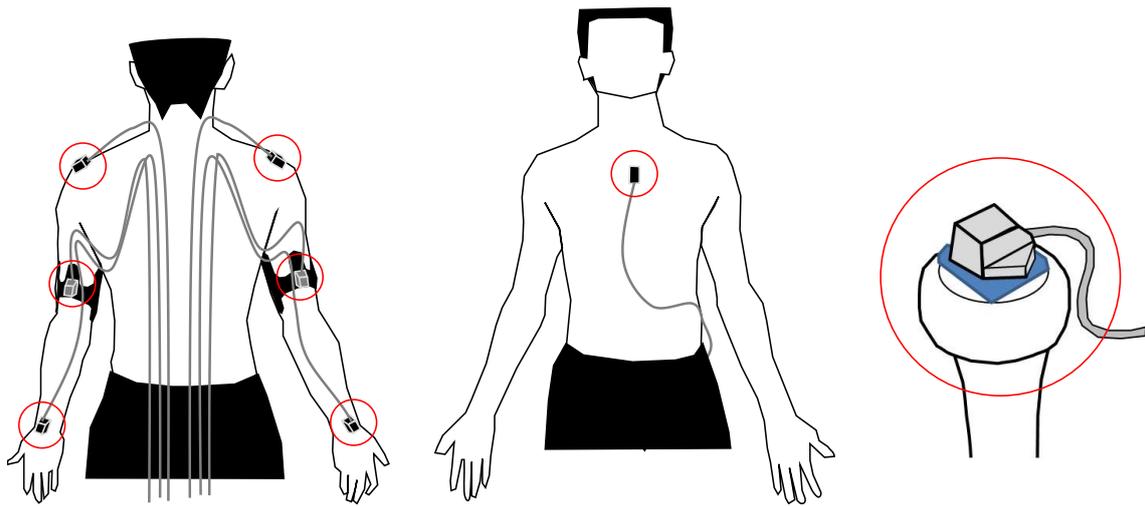


図 2-2 各セグメントに貼付・固定されたセンサの位置.

各セグメントの解剖学的座標系を定義するために、各セグメントのランドマーク合計 19 点をスタイラスを用いて皮膚上から触診・デジタイズし、各セグメントに固定されたセンサに対する 3 次元座標値として記録した。各セグメントにおけるランドマークは、胸郭セグメントでは、胸骨丙 (SN)、剣状突起 (XP)、第 7 頸椎棘突起 (C7)、第 8 胸椎棘突起 (T8) の 4 点、左右肩甲骨では、肩峰外側縁 (AA)、肩甲棘内側縁 (SP)、肩甲骨下角 (IA) の各 3 点、左右上腕セグメントでは、上腕骨内側上顆 (ME)、上腕骨外側上顆 (LE) の各 2 点、左右前腕セグメントでは、肘頭 (OL)、尺骨茎状突起 (US)、橈骨茎状突起 (RS) の各 3 点であった。また、左右肩甲上腕関節中心 (GH) は、上腕下垂位から肩甲上腕関節を中心として小さい弧を描くような運動を行っている際の瞬時らせん軸を 30Hz で繰り返し算出し、それらの Pivot point として推定した。

被験者には、十分なウォーミングアップを行わせた後、バッティングケージ内でマシン打撃を行わせた。ホームベースから既定の距離離れた位置に設置されたドラム式ピッチングマシンから平均速度  $30.4 \pm 1.8 \text{ m/s}$  で硬式野球ボールを投じた。被験者には、投じられたボールをセンター方向へ打ち返すように指示した。センターライン (ホームベースの頂点からマウンド上のプレートの中点を結ぶライン) を中心に左右各  $15^\circ$  の範囲に打球が飛翔し、

かつ被験者の自己評価が高い 5 試技を分析対象とした。

## 2.3 データ処理

### 2.3.1. 解剖学的座標系および関節運動の定義

静止座標系 ( $R_G$ ) は、トランスミッタ内に定義されており、鉛直上向き方向のベクトルを  $Z_G$ 、センターラインに平行で、ホームベースからマウンドへ向かうベクトルを  $Y_G$ 、 $Y_G$  と  $Z_G$  の外積によって得られるベクトルを  $X_G$  とした。バット座標系 ( $R_B$ ) は、バット長軸に平行でグリップエンドからバットヘッドへ向かうベクトルを  $Z_B$ 、 $Z_B$  に直交する面上に存在し、互いに直交する 2 つのベクトルをそれぞれ  $X_B$ 、 $Y_B$  とした。

デジタル化によって計測された解剖学的ランドマークの座標値から各セグメントに固定された解剖学的座標系を定義し、すべて  $R_G$  について計測した。胸郭座標系 ( $R_T$ ) は、 $XP$  と  $T8$  の中点から  $SN$  と  $C7$  の中点へと向かうベクトルを  $Z_T$  とし、 $T8$  から  $XP$  へ向かうベクトルと  $Z_T$  との外積により得られるベクトルを  $X_T$ 、 $Z_T$  と  $X_T$  の外積によって得られるベクトルを  $Y_T$  と定義した。右上腕座標系 ( $R_{rH}$ ) は、 $rME$  と  $rLE$  の中点から  $rGH$  へ向かうベクトルを  $Z_{rH}$  とし、 $rME$  から  $rLE$  へ向かうベクトルと  $Z_{rH}$  との外積によって得られるベクトルを  $Y_{rH}$ 、 $Y_{rH}$  と  $Z_{rH}$  との外積によって得られるベクトルを  $X_{rH}$  と定義した。左上腕座標系 ( $R_{lH}$ ) は、 $lME$  と  $lLE$  の中点から  $lGH$  へ向かうベクトルを  $Z_{lH}$  とし、 $lLE$  から  $lME$  へ向かうベクトルと  $Z_{lH}$  との外積によって得られるベクトルを  $Y_{lH}$ 、 $Y_{lH}$  と  $Z_{lH}$  との外積によって得られるベクトルを  $X_{lH}$  と定義した。右前腕座標系 ( $R_{rF}$ ) は、 $rUS$  から  $rRS$  へ向かうベクトルを  $Z_{rF}$ 、 $rUS$  から  $rRS$  へ向かうベクトルと  $Z_{rF}$  の外積によって得られたベクトルを  $Y_{rF}$ 、 $Y_{rF}$  と  $Z_{rF}$  の外積によって得られたベクトルを  $X_{rF}$  と定義した。左前腕座標系 ( $R_{lF}$ ) は、 $lRS$  から  $lUS$  へ向かうベクトルを  $Z_{lF}$ 、 $lRS$  から  $lUS$  へ向かうベクトルと  $Z_{lF}$  の外積によって得られたベクトルを  $Y_{lF}$ 、 $Y_{lF}$  と  $Z_{lF}$  の外積によって得られたベクトルを  $X_{lF}$  と定義した (図 2-3)。

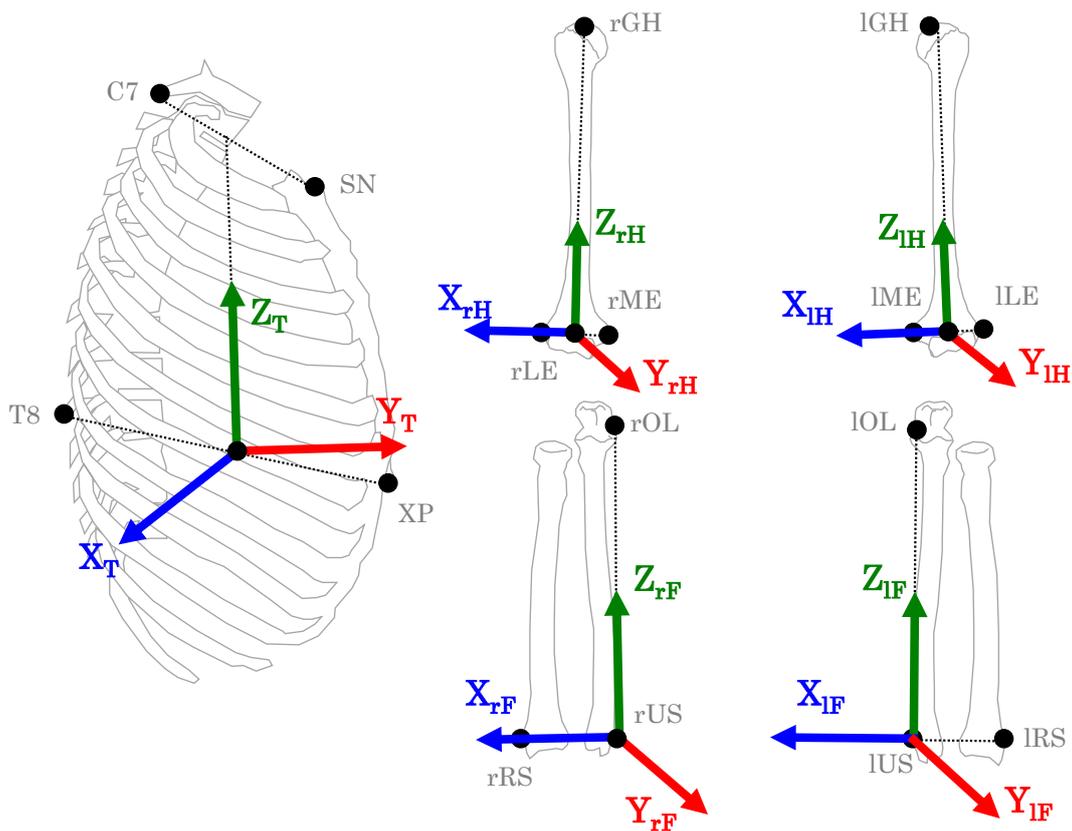


図 2-3 デジタイズされた各セグメントのランドマークおよび、各セグメントの座標系（胸郭座標系，右上腕座標系，左上腕座標系，右前腕座標系，左前腕座標系）。

セグメント間の相対的な方位は解剖学的な表記に沿う関節運動として定義されたオイラー角，またはカーダン角を用いて算出した．右上腕の角度は，胸郭座標系 ( $R_T$ ) から右上腕座標系 ( $R_{rH}$ ) への変換を定められた順序 (Z-Y-Z) で行うオイラー角を用いて算出した．回転の順序は，胸郭座標系 ( $R_T$ ) と一致する移動座標系 ( $R_{rH0} : X_{rH0}, Y_{rH0}, Z_{rH0}$ ) を  $Z_{rH0}$  軸まわりに  $\theta_H$  回転させ，次に 1 回目の回転によって得られた移動座標系 ( $R_{rH1} : X_{rH1}, Y_{rH1}, Z_{rH1}$ ) を  $Y_{rH1}$  軸まわりに  $\varphi_H$  回転させ，そして 2 回目の回転によって得られた移動座標系 ( $R_{rH2} : X_{rH2}, Y_{rH2}, Z_{rH2}$ ) を  $Z_{rH2}$  軸まわりに  $\psi_H$  回転させた移動座標系 ( $R_{rH3} : X_{rH3}, Y_{rH3}, Z_{rH3}$ ) を算出した． $\theta_H, \varphi_H, \psi_H$  をそれぞれ肩関節水平内外転角度，上腕拳上下制角度，肩関節内外旋角度とした．それぞれの回転前の移動座標系 ( $R_{pre}$ ) に対する回転後の移動座標系 ( $R_{post}$ ) の方位を回転行列  $A_{(R_{post}/R_{pre})}$  を用いて表した．これらより，移動座標系  $R_{rH0}$  に

対する移動座標系  $R_{rH3}$  の方位を表す回転行列を求めた.

$$\begin{aligned} A_{(R_{rH1}/R_{rH0})} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_H & -\sin \theta_H & 0 \\ \sin \theta_H & \cos \theta_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_{(R_{rH2}/R_{rH1})} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_H & 0 & \sin \varphi_H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_H & 0 & \cos \varphi_H \end{bmatrix} \\ A_{(R_{rH3}/R_{rH2})} &= \begin{bmatrix} \cos \psi_H & -\sin \psi_H & 0 \\ \sin \psi_H & \cos \psi_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$A_{(R_{rH3}/R_{rH0})} = A_{(R_{rH1}/R_{rH0})} \cdot A_{(R_{rH2}/R_{rH1})} \cdot A_{(R_{rH3}/R_{rH2})}$$

$$A_{(R_{rH3}/R_{rH0})}$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin \theta_H \sin \psi_H + \cos \theta_H \cos \varphi_H \cos \psi_H & \sin \theta_H \cos \psi_H - \cos \theta_H \cos \varphi_H \sin \psi_H & \cos \theta_H \sin \varphi_H \\ \cos \theta_H \sin \psi_H + \sin \theta_H \cos \varphi_H \cos \psi_H & \cos \theta_H \cos \psi_H + \sin \theta_H \cos \varphi_H \sin \psi_H & \sin \theta_H \sin \varphi_H \\ -\sin \varphi_H \cos \psi_H & \sin \varphi_H \sin \psi_H & \cos \varphi_H \end{bmatrix}$$

(式 2-1)

また, 胸郭座標系に対する右上腕座標系の方位と, 移動座標系  $R_{rH0}$  に対する移動座標系  $R_{rH3}$  の方位が一致することから, 胸郭座標系に対する右上腕座標系の方位は次のようにも表すことができる.

$$\begin{aligned} A_{(R_{rH3}/R_{rH0})} &= A_{(R_T/R_G)}^T \cdot A_{(R_rH/R_G)} \\ A_{(R_{rH3}/R_{rH0})} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(式 2-2)

式 2-1 と式 2-2 から,  $\theta_H$ ,  $\varphi_H$ ,  $\psi_H$  を算出した.

$$\theta_H = \tan^{-1}(a_{23}/a_{13})$$

$$\varphi_H = \tan^{-1}\left(\sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}/a_{33}\right)$$

$$\psi_H = -\tan^{-1}(a_{32}/a_{31})$$

左上腕角度は, 右上腕と同様にオイラー角を用いて算出した. なお, 左上腕角度は右上腕角

度と変化の方向を解剖学的用語と一致させるために算出された水平内外転角度，上腕拳上下制角度に-1を乗じた。

右前腕の角度は，右上腕座標系 ( $\mathbf{R}_{rH}$ ) から右前腕座標系 ( $\mathbf{R}_{rF}$ ) への変換を定められた順序 ( $\mathbf{X-Z-Y}$ ) で行うカーダン角を用いて算出した。回転の順序は，右上腕座標系と一致する移動座標系 ( $\mathbf{R}_{rF0} : \mathbf{X}_{rF0}, \mathbf{Y}_{rF0}, \mathbf{Z}_{rF0}$ ) を  $\mathbf{X}_{rF0}$  軸まわりに  $\theta_F$  回転させ，次に 1 回目の回転によって得られた移動座標系 ( $\mathbf{R}_{rF1} : \mathbf{X}_{rF1}, \mathbf{Y}_{rF1}, \mathbf{Z}_{rF1}$ ) を  $\mathbf{Y}_{rF1}$  軸まわりに  $\varphi_F$  回転させ，そして 2 回目の回転によって得られた移動座標系 ( $\mathbf{R}_{rF2} : \mathbf{X}_{rF2}, \mathbf{Y}_{rF2}, \mathbf{Z}_{rF2}$ ) を  $\mathbf{Z}_{rF2}$  軸まわりに  $\psi_F$  回転させた移動座標系 ( $\mathbf{R}_{rF3} : \mathbf{X}_{rF3}, \mathbf{Y}_{rF3}, \mathbf{Z}_{rF3}$ ) を算出した。  $\theta_F, \psi_F$  をそれぞれ肘関節屈曲伸展角度，前腕回内回外角度とした。それぞれの回転前の移動座標系 ( $\mathbf{R}_{pre}$ ) に対する回転後の移動座標系 ( $\mathbf{R}_{post}$ ) の方位を回転行列  $A_{(\mathbf{R}_{post}/\mathbf{R}_{pre})}$  を用いて表した。これらより，移動座標系  $\mathbf{R}_{rF0}$  に対する移動座標系  $\mathbf{R}_{rF3}$  の方位を表す回転行列を求めた。

$$A_{(\mathbf{R}_{rF1}/\mathbf{R}_{rF0})} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_F & -\sin \theta_F \\ 0 & \sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix}$$

$$A_{(\mathbf{R}_{rF2}/\mathbf{R}_{rF1})} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_F & 0 & \sin \varphi_F \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_F & 0 & \cos \varphi_F \end{bmatrix}$$

$$A_{(\mathbf{R}_{rF3}/\mathbf{R}_{rF2})} = \begin{bmatrix} \cos \psi_F & -\sin \psi_F & 0 \\ \sin \psi_F & \cos \psi_F & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{(\mathbf{R}_{rF3}/\mathbf{R}_{rF0})} = A_{(\mathbf{R}_{rF1}/\mathbf{R}_{rF0})} \cdot A_{(\mathbf{R}_{rF2}/\mathbf{R}_{rF1})} \cdot A_{(\mathbf{R}_{rF3}/\mathbf{R}_{rF2})}$$

$$A_{(\mathbf{R}_{rF3}/\mathbf{R}_{rF0})}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \varphi_F \cos \psi_F & -\cos \varphi_F \sin \psi_F & \sin \varphi_F \\ \cos \theta_F \sin \psi_F + \sin \theta_F \sin \varphi_F \cos \psi_F & \cos \theta_F \cos \psi_F - \sin \theta_F \sin \varphi_F \sin \psi_F & -\sin \theta_F \cos \varphi_F \\ \sin \theta_F \sin \psi_F - \cos \theta_F \sin \varphi_F \cos \psi_F & \sin \theta_F \cos \psi_F + \cos \theta_F \sin \varphi_F \sin \psi_F & \cos \theta_F \cos \varphi_F \end{bmatrix}$$

(式 2-3)

また，右上腕座標系に対する右前腕座標系の方位と，移動座標系  $\mathbf{R}_{rF0}$  に対する移動座標系  $\mathbf{R}_{rF3}$  の方位が一致することから，右上腕座標系に対する右前腕座標系の方位は次のようにも表すことができる。

$$A_{(R_{rF3}/R_{rF0})} = A_{(R_{rH}/R_G)}^T \cdot A_{(R_{rF}/R_G)}$$

$$A_{(R_{rF3}/R_{rF0})} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

(式 2-4)

式 2-3 と式 2-4 から  $\theta_F$ ,  $\psi_F$  を算出した.

$$\theta_F = -\tan^{-1}(b_{23}/b_{33})$$

$$\psi_F = \tan^{-1}(b_{12}/b_{11})$$

左前腕角度は, 右前腕と同様にカーダン角を用いて算出した. なお, 左前腕角度は右前腕角度と変化の方向を解剖学的用語と一致させるために算出された前腕回内回外角度に-1 を乗じた.

### 2.3.2 セグメントの角速度の算出方法

各セグメントの角速度は, 静止座標系に対する各セグメントの方位変化から算出した. あるセグメントの  $n^{\text{th}}$  フレーム目の角速度を算出するために, まず  $n-1^{\text{th}}$  フレームのセグメント座標系に対する  $n+1^{\text{th}}$  フレームのセグメント座標系の方位を行列の演算により算出した. 算出された行列の各因子を用いて 2 フレーム間に回転したセグメントの回転軸とその回転角度を求めた. 計算によって算出された回転角度を時間微分することによって, 角速度の大きさを算出した. その角速度の大きさと回転軸を用いて角速度ベクトルを算出した. 各セグメントの  $n^{\text{th}}$  フレームの角速度ベクトルをそれぞれの座標系の Z 軸へ投影した成分が, 各セグメントの長軸まわりの角速度を示す. すなわち, バット座標系ではバットのローリング角速度を表し, 前腕座標系では前腕の回内回外方向の角速度を表すこととなる.

## 2.4 データ分析

すべての打者において、インパクトの 300ms 前に踏み出し足が接地していたことから、インパクトの 300ms をスイング開始の瞬間と定義した。スイング開始から、インパクトの 100ms 後までを分析区間とした。なお、インパクトの瞬間を定義するフレームは、バットの角速度がインパクトの衝撃による振動によって、連続的な増減から逸脱したフレームとした。

分析区間におけるローリング角速度、および両前腕の長軸まわりの角速度、それぞれの関節角度の経時変化を算出した。スイング開始からインパクトまでの間において左右の上肢の関節角度変化量を次のように算出した。引手側では、肩関節外旋角度を肩関節最大内旋位から肩関節最大外旋位までの角度の差、前腕回外角度を前腕最大回内位から前腕回外位までの角度の差としてそれぞれ算出した。押手側では、肩関節内旋角度を肩関節最大外旋位から肩関節最大内旋位までの角度の差、前腕回内角度を前腕最大回外位から前腕最大回内位までの角度の差としてそれぞれ算出した。またそれぞれの関節運動開始のタイミングは、運動の方向が切り替わる時刻とした。

## 2.5 統計処理

各算出項目において、分析対象とした 5 試技の平均値を各被験者の代表値とした。そして、各算出項目において全被験者の平均値と標準偏差を算出した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 ローリング角速度

スイング開始とともにローリング角速度は大きくなり、インパクトの 100ms 前に小さくなるものの、インパクトに向けて再び大きくなった (図 2-4)。インパクト直前におけるローリング角速度は、 $725.4 \pm 229.1^\circ/\text{s}$  であった。また、インパクト後もローリング角速度は増加し続け、最大  $1807.8 \pm 598.0^\circ/\text{s}$  まで達した。対応のある t 検定を行った結果、インパクト後におけるローリング角速度の最大値は、インパクト直前におけるローリング角速度よりも有意に大きい値であった ( $p < 0.05$ )。

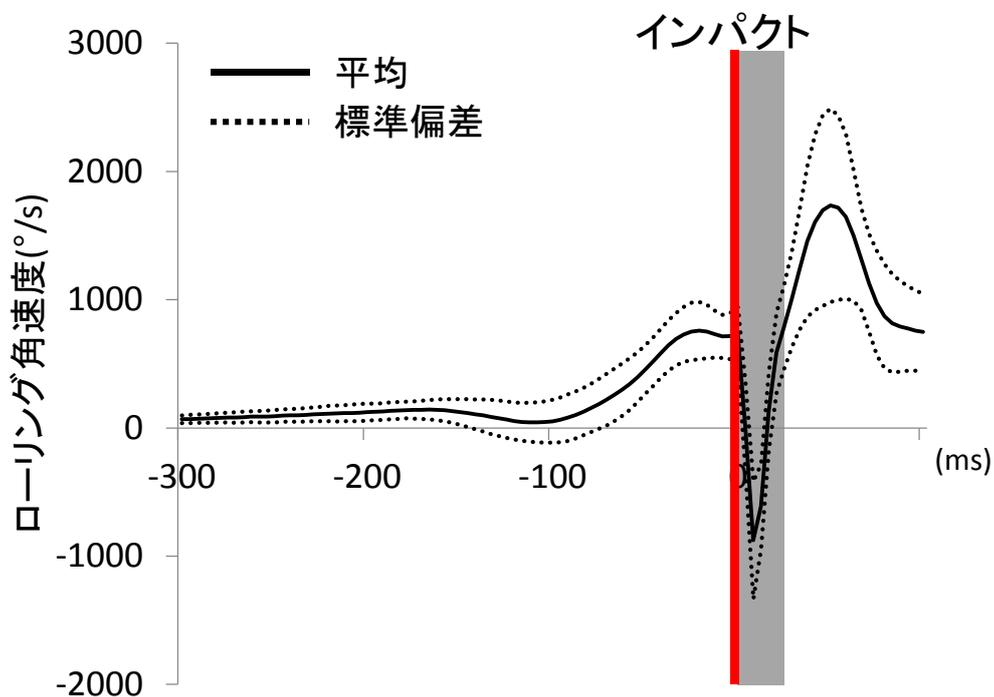


図 2-4 スイング開始からインパクト後 100 ms までのローリング角速度の変化

### 3.2 左右前腕の長軸まわりの角速度

引手前腕長軸まわりの角速度は、スイング開始からは回内方向の角速度を有するものの、インパクトの  $64.3 \pm 35.3\text{ms}$  前から回外方向の角速度へと変化した。インパクト直前における前腕長軸まわりの角速度は、回外方向に  $396.3 \pm 278.5^\circ/\text{s}$  であった。インパクト後も引手の前腕長軸まわりの角速度は増加し続け、最大  $1840.4 \pm 535.1^\circ/\text{s}$  まで達していた (図 2-5)。

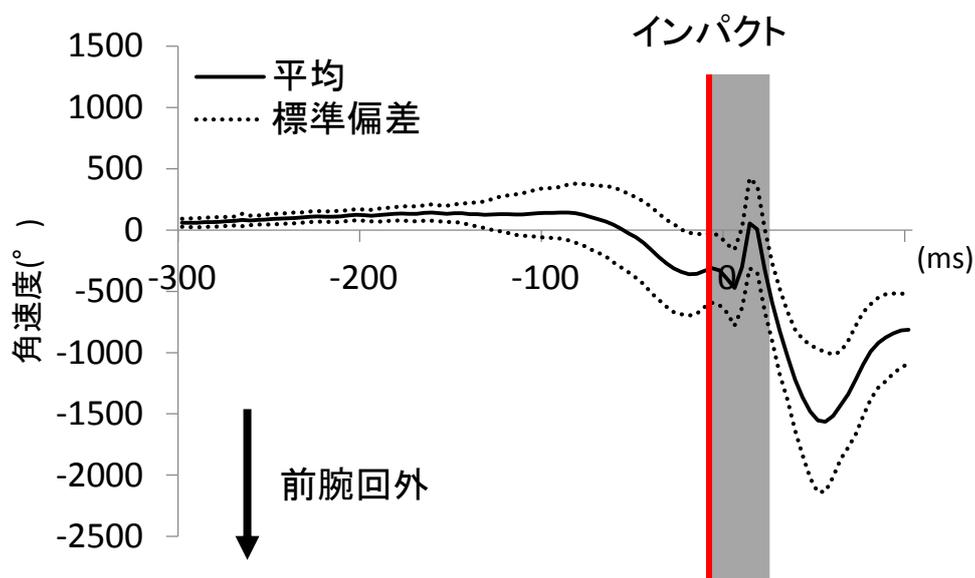


図 2-5 引手前腕の長軸まわりの角速度の経時変化 (平均値および標準偏差)。灰色の部分  
はインパクトの衝撃によってデータが乱れている区間である。

引手上肢の関節運動 (肩関節内外旋, 前腕回内回外) をみると, 引手の肩関節はスイング開始から内旋していき, インパクトの  $157.6 \pm 62.2\text{ms}$  前から外旋するものの (角度変化量:  $9.5 \pm 4.6^\circ$ ), インパクトに向けて再び内旋していった。また, 前腕では, スイング開始から回内していくものの, インパクトの  $100.7 \pm 58.3\text{ms}$  前からインパクトまでは回外していた (角度変化量:  $17.5 \pm 12.5^\circ$ )。また, 前腕の角度は, インパクト後も回外方向へ変化した (図 2-6)。これらの回旋運動をもとに引手前腕長軸まわりの角速度に着目すると, スイング初期から中期における前腕長軸まわりの回内方向の角速度は, 肩関節内旋と前腕回内によるものと考えられる。そして, インパクトに向けて引手の前腕長軸まわりの角速度が回外方

向へとなるのは、前腕が回外することによるものと考えられる。

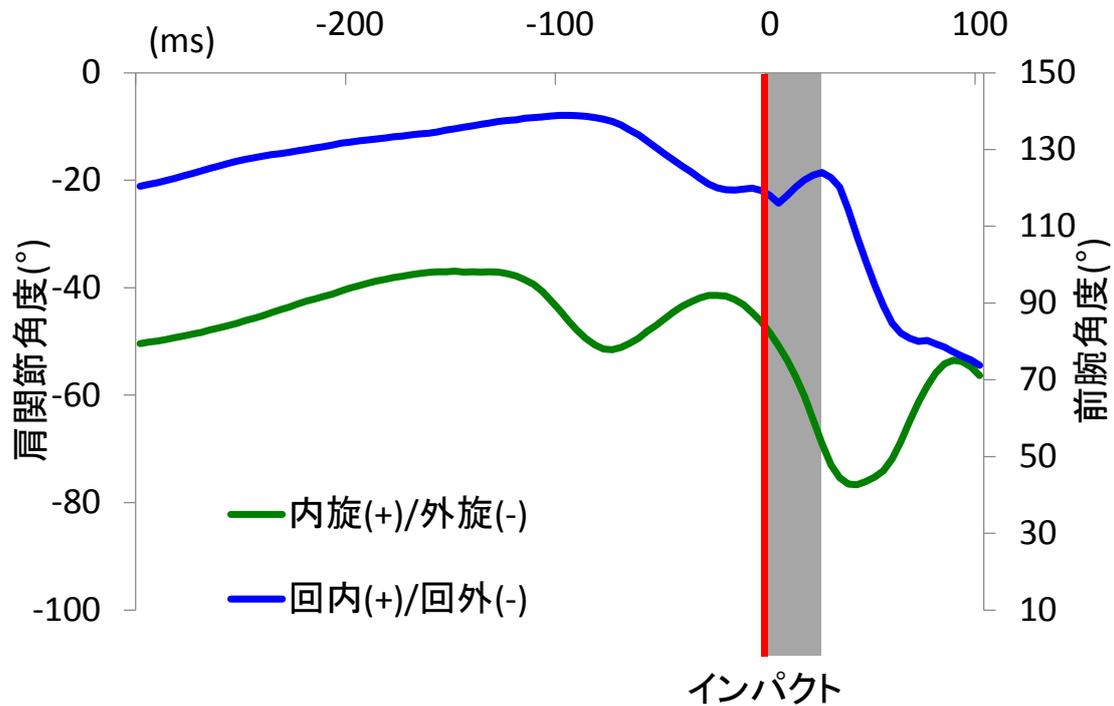


図 2-6 典型的な打者の引手における肩関節内外旋と前腕回外回内の角度変化

引手では、インパクトに向けてリストターンを構成する前腕長軸まわりの回外方向の角速度および前腕の回外運動がみられた。バット長軸と引手前腕長軸が平行になった場合、前腕の回外運動は、ローリングと同じ方向の運動である。川村ら (2001) の報告によると、野球の打撃ではインパクトに向けて、手関節の尺屈方向への角速度が大きくなることが示されている。これは、バット長軸と引手前腕の長軸が平行に近づくことを示すものであり、実際にバット長軸と前腕長軸のなす角度は、インパクトの  $63.7 \pm 49.4\text{ms}$  前から  $90^\circ$  以上となり、インパクト直前では、 $149.1 \pm 15.0^\circ$  となっていた。また、インパクト後は  $150^\circ$  以上の角度を保っていた。これらは、引手では前腕の長軸まわりの回転運動がローリングを生み出すことに貢献していることを示唆するものである。

押手の前腕長軸まわりの角速度は、スイング開始から回外方向の角速度を有していた。イ

ンパクトの  $41.4 \pm 10.9\text{ms}$  前に最大  $1707.9 \pm 223.4\%/s$  まで達しており、インパクト直前では  $445.2 \pm 279.2\%/s$  であった。押手前腕の角速度が回内方向へと変化したのはインパクト後であった (図 2-7)。

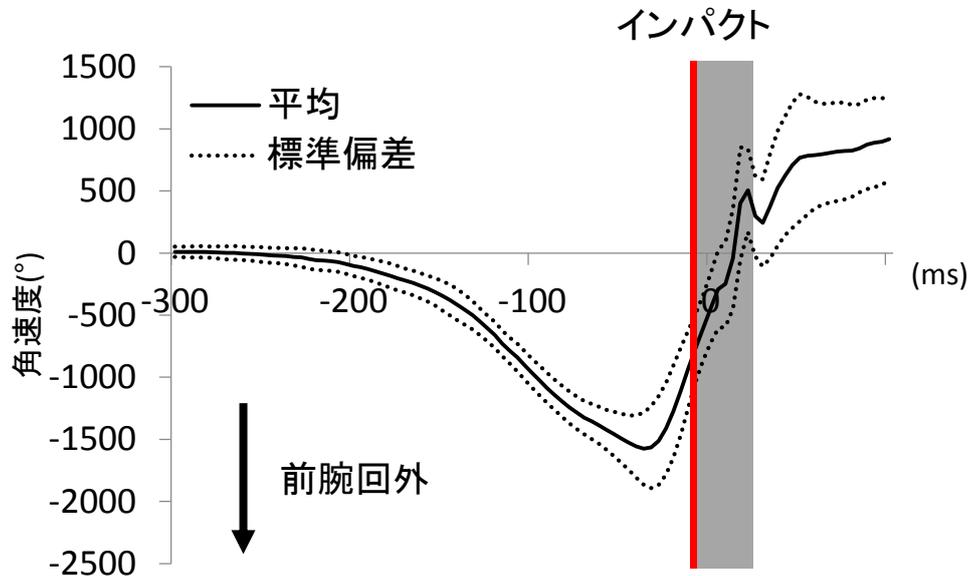


図 2-7 押手前腕の長軸まわりの角速度の経時変化 (平均値および標準偏差)。灰色の部分 はインパクトの衝撃によってデータが乱れている区間である。

押手の肩関節はスイング開始から外旋し、インパクトの  $58.1 \pm 38.3\text{ms}$  前に内旋運動を開始した (角度変化量:  $20.3 \pm 21.0^\circ$ )。前腕では、インパクトの  $97.7 \pm 18.7\text{ms}$  前から回外しはじめ、インパクト後まで断続的に回外していた。前腕が回内し始めるのは、インパクトの  $34.5 \pm 27.6\text{ms}$  後であった。押手上肢の回旋運動と前腕長軸まわりの角速度との関係を見ると、スイング開始からインパクトまでの一貫した前腕長軸回外方向の角速度は、肩関節外旋や前腕回外によって生じていたと考えられる。一方で、インパクト後の回内方向の前腕長軸まわりの角速度は、肩関節内旋や前腕回内によるものであると考えられる (図 2-8)。

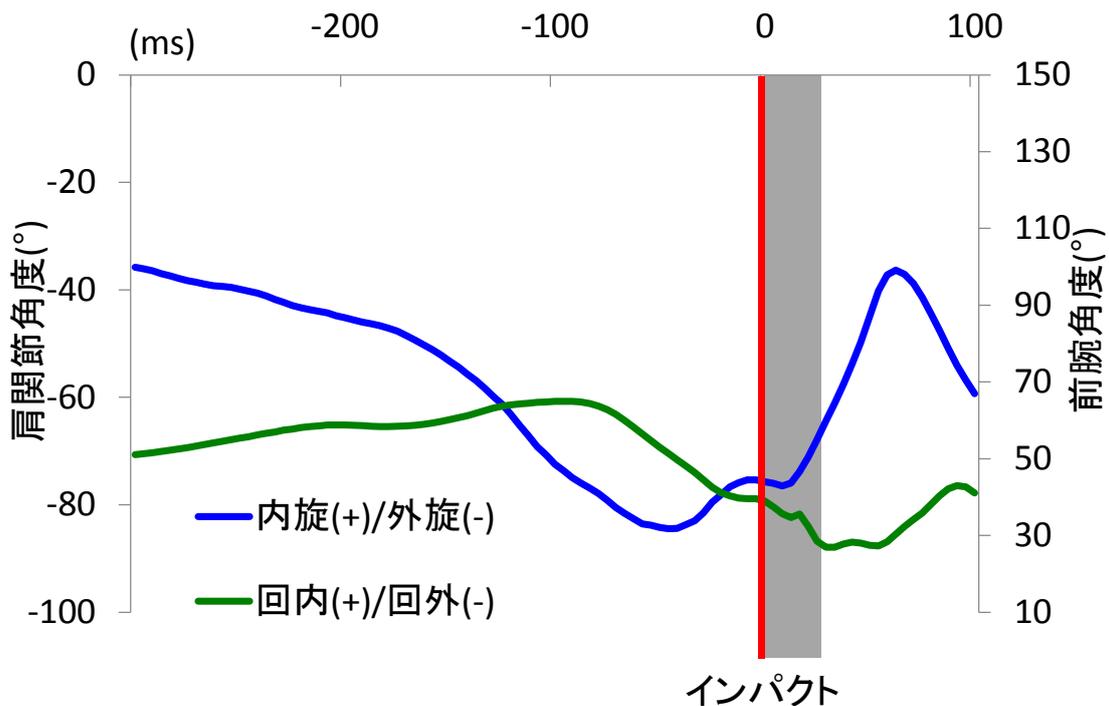


図 2-8 典型的な打者の押手における肩関節内外旋と前腕回外回内の角度変化

押手の前腕長軸まわりの角速度は、スイング開始からインパクトまで一貫して回外方向を示しており、リストターンを構成する前腕長軸まわりの回内方向の角速度および前腕の回内運動はみられなかった。この原因について考察する。インパクト前のバット長軸と押手前腕長軸のなす角度は、ほぼ  $90^\circ$  であった ( $88.5 \pm 8.8^\circ$ )。このような肢位で前腕が長軸まわりに回転すると、バットは長軸まわりには回転せず、バット長軸そのものが回転することとなる。すなわち、押手の前腕長軸まわりの回外方向の運動は、ローリングに貢献する動作ではなく、バットヘッドを倒すことに貢献する動作であると考えられる。バット長軸と前腕長軸とのなす角度が  $90^\circ$  を越え、 $100^\circ$  以上となるのはインパクト後であった。つまり、押手においてリストターンを構成する前腕の回内がみられなかったのは、スイング中の押手前腕の役割がバット長軸と前腕長軸を  $90^\circ$  に保持し、回外することによってバット長軸そのものを回転させ、バットヘッドを倒すことに貢献する運動であったためだと考えられる。

### 3.3 リストターンが生じるタイミング

引手ではインパクト直前やインパクト後には、リストターンを構成する前腕の回外方向の角速度および回外方向への関節運動がみられた。一方で、押手では、インパクト前には前腕は引手と同様に回外方向への角速度を有しており、リストターンを構成する動作や関節運動はみられなかった。押手前腕の回内方向への角度変化が生じたのは、インパクトの約35ms後であった。これは、引手の前腕回外と押手の前腕回内の協調運動であるリストターンがインパクト前には生じず、インパクト後に生じていることを示すものである (図 2-9)。

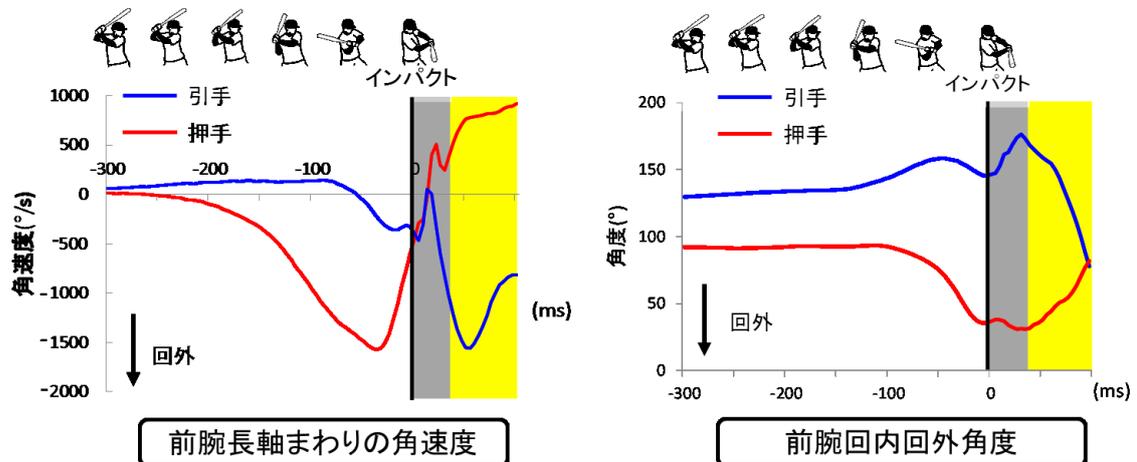


図 2-9 引手と押手における前腕長軸まわりの角速度の経時変化 (左図) と前腕回内回外角度の経時変化 (右図). 両図ともにインパクト後の黄色いゾーンからリストターンが開始する. 灰色の部分にはインパクトの衝撃によってデータが乱れている区間である.

すなわち、リストターンという左右前腕の協調運動は、インパクト直前におけるバットのローリングを発生させる原動力とはならないことが示されたのである。ローリングを生じさせようとし、通常の打撃においてリストターンを行おうとすることは、Sawicki et al. (2003) が指摘したように、打撃動作が不自然となり、バットのヘッドスピードを下げるなどの不利益を被る可能性がある。バットが鉛直軸まわりに回転していると仮定した場合、スイング角速度が  $2500^{\circ}/s$  であるとする、35ms 間にバットの水平角は約  $88^{\circ}$  変化する。センター方

向へ打撃しようとした際に、バット長軸がセンターラインと直交した姿勢でインパクトすると、 $88^\circ$ というバットの水平角の変化はバットヘッドが投手方向を向くような位置まで到達してしまうことを意味する。このように、通常の打撃においてリストターンが生じるのは、インパクトから時間が大きく経過した時点である。すなわち、インパクト前に意図的にリストターンを行おうとすると、Sawicki et al (2003) が懸念した不自然な打撃動作となってしまう可能性があり、ローリング角速度以外のパラメータ（バットヘッドスピードやバットの姿勢）に対して負の貢献をすることが考えられる。一方で、先述したようにインパクト後ではリストターンがみられた。また、インパクト後のローリング角速度は、インパクト直前の値よりも大きくなっていた。これは、インパクト後の高速なローリングはリストターンによって生み出されていることを示す結果であると考えられる。

押手側は、スイング開始から肩関節水平内転、上腕の下制、肩関節外旋を組み合わせた運動をすることによって、上腕はインパクトに向けて体側部へと近づく（図 2-10）。

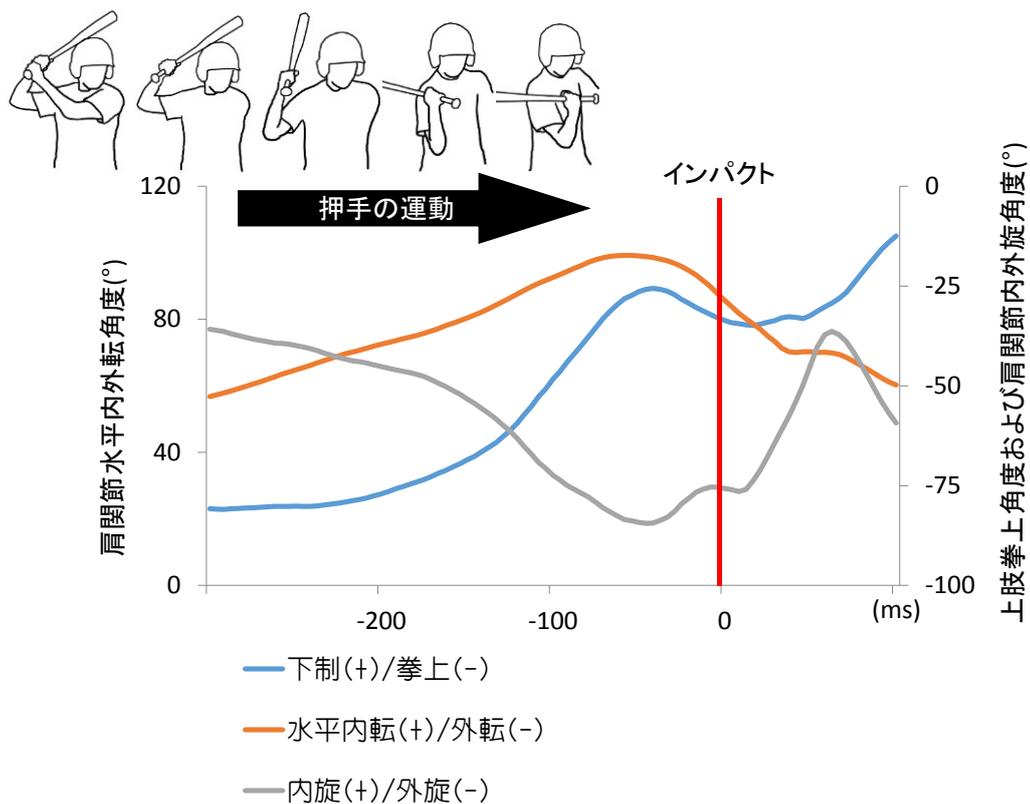


図 2-10 典型的な打者における押手の肩関節の関節運動の角度変化

その際に前腕が回外することによって、バット長軸と肘関節の屈曲伸展軸が平行に近づいていたと考えられる。バット長軸と肘関節屈曲伸展軸のなす角度は、スイング中に  $69.5 \pm 10.1^\circ$  からインパクト直前には  $19.6 \pm 8.8^\circ$  へと変化しており、これはバット長軸と肘関節屈曲伸展軸が平行に近づいていることを示している。この肢位では、前腕の回内運動ではなく、肘関節の伸展や手関節の背屈によって、バットは長軸まわりに回転するのである。つまり、押手側では肘関節の伸展と手関節の背屈がバットのローリングを生み出しうる動作であることが推察される。

#### 4. まとめ

本研究の目的は、実際の打撃において上肢の運動を計測し、リストターンが生じるタイミングを明らかにし、リストターンがローリングを生み出しうる動作であるかを検討することであった。その結果、リストターンが生じるのはインパクト後であることが明らかとなった。これらの結果は、リストターンという左右前腕の協調運動が、インパクト時におけるバットのローリングを発生させる原動力とはならないことを示すものである。

### 第3章 野球の打撃におけるバットのローリング発生メカニズム

#### 1. はじめに

第2章では、バットのローリングを生み出す運動として、現場などで考えられているリストターン（引手前腕回外と押手前腕回内を組み合わせた協調運動）が、実際にインパクト前に生じているのかを検証した。引手側では、インパクト前にリストターンを構成する前腕の回外が観察されたが、押手側では、インパクト前には前腕の回内がみられなかった。これらの結果は、リストターンがインパクト前に生じていないことを示しており、インパクト前のローリングは、リストターンによって生じていないことを示すものであった。しかしながら、バットのローリングが発生する原因を探るには、身体運動とバットの運動の関連をみるだけでは不十分であり、力学的にバットの運動を観察する必要がある。

力学的に考えると、バットのローリングが生じるためには、バットがローリング方向の角運動量を有する必要がある。したがって、バットの角運動量ベクトルに対して、バット長軸が直交している場合、ローリングは生じ得ない（図 3-1a）。角力積・角運動量の法則をもとにローリングのメカニズムを考えると、バットがローリングの角運動量を獲得するためには、ローリング方向への角力積をバットに加える方法（メカニズム 1；図 3-1b）、および、バットにローリング方向への角力積を加えないが、バットの角運動量ベクトルに対してバットの慣性主軸の向きを変化させることによりバット長軸まわりの角運動量を獲得する方法（メカニズム 2；図 3-1c）が考えられる。メカニズム 1 は外力要因によるものであり、メカニズム 2 は運動依存要因によるものと考えることができる。

野球のバッティングにおいて、ローリングがどのように生じているのかを明らかにすることで、ローリング角速度を高める方策を提案することができ、打撃パフォーマンスの向上につながる知見が得られると考えられる。そこで本研究では、バットの角運動量とバット長軸の向きに着目し、大学野球選手やプロ野球選手が実際のバッティング中にどのようにロ

ーリングを獲得しているのかを明らかにすることを目的とした。

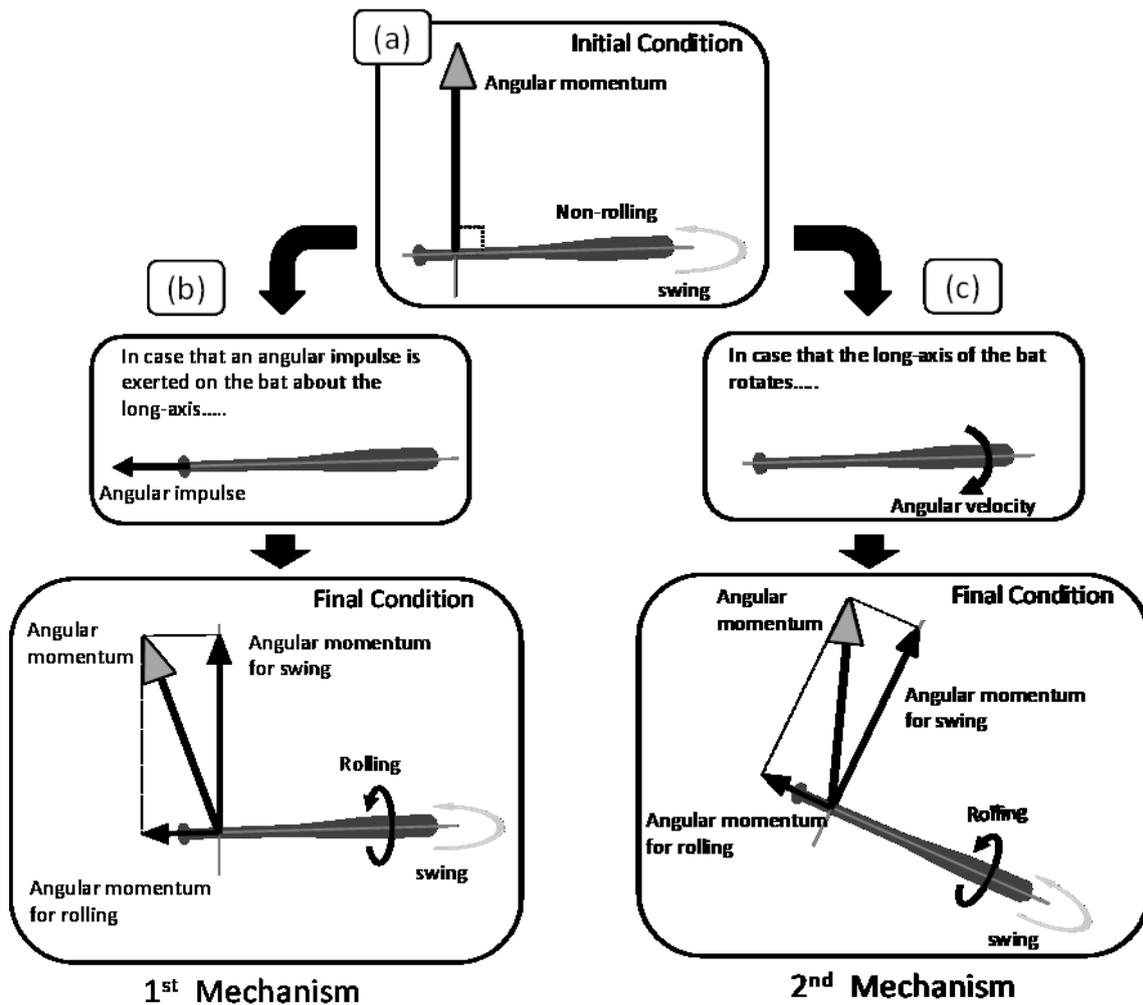


図 3-1 ローリングを引き起こす 2 つのメカニズム. (a) バット長軸に対して角運動量ベクトルが直交している場合, ローリングは生じない. (b) 打者がバット長軸まわりに角力積を作用させることによってローリングが生じる. (c) バット長軸の向きが角運動量ベクトルに対して変化することによってローリングが生じる.

## 2.方法

### 2.1 被験者

被験者は、プロ野球選手 1 名と大学野球選手 15 名の計 16 名であり(20.4±2.6 歳, 175.0 ±3.7cm, 74.0±6.4kg) であり, このうち右打者が 10 名, 左打者が 6 名であった. 本実験の実施にあたり, 早稲田大学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. 被験者には事前に実験の主旨, 内容を十分に説明し, 書面による実験参加の同意を得た.

### 2.2 データ収集

バットの動きは電磁ゴニオメータ(LIBERTY, POLHEMUS 社製, Colchester, VT)を用いて 240Hz で計測した. 本研究では電磁ゴニオメータの 1 つのセンサを用いて, バットの動きを計測した. バッティング中にバットや身体が触れないように, トランスミッタは打者の 30cm 後方, 高さ 90cm の位置に設置した. 静止座標系 ( $R_G: X_G, Y_G, Z_G$ ) はトランスミッタによって定義されるため,  $Y_G$  がホームベースから投手方向へ向かい,  $Z_G$  が鉛直軸上方向となるようにトランスミッタを設置した (図 3-2). 硬式用木製バット (2TW-10455YT, ミズノ社製, 84cm, 928g) のグリップエンドにセンサを装着した (図 3-2). センサによって定義された座標系 ( $R_S: X_S, Y_S, Z_S$ ) の  $Z_S$  がバットのグリップエンドからバットヘッドへ向かうベクトルと一致するようにセンサをバットに装着した.  $X_S, Y_S$  は  $Z_S$  に直交する平面上に存在し, 互いに直交する任意のベクトルであった (図 3-2).

インパクト時の衝撃によるセンサへのダメージを防ぐため, 厚さ 5mm の衝撃吸収パットをバットとセンサの間に介した. センサのコードはスイングの妨げとならないように, 打者の前腕と背中にテープを用いて貼付した.

この電磁ゴニオメータの測定精度は, トランスミッタとセンサの距離が 76cm (30 インチ) 以内の場合, 位置計測における誤差の RMS (Root Mean Square) が 0.76mm, 角度計測における誤差の RMS が 0.15°と記されている (LIBERTY User manual). 測定に先立ち, 測

定範囲内における磁場のひずみによる位置・方位の計測誤差を木製の棒に固定された 2 つのセンサを用いて測定した。センサ 1 に対するセンサ 2 の相対的な位置・方位は一定に保たれるため、測定範囲内でセンサ付木製の棒を動かした際に観察された相対位置・方位の変化を磁場のひずみによる誤差として算出した。その結果、位置の誤差は 1cm 未満、方位の誤差は 3°未満であった。ピッチングマシンによる投球速度の計測とスイング開始時刻の確認のために、打者の正面（右打者の場合、ホームベースから左打席へと向かう方向）に高速度カメラ（Exilim EX-F1, CASIO 社製）を設置し、各試技を 300Hz で撮影した。

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、バッティングケージ内でフリーバッティングを行わせた。ホームベースから既定の距離（18.44m）離れた位置に設置されたドラム式ピッチングマシンから平均速度  $30.4 \pm 1.8 \text{m/s}$  で硬式野球ボールを投じた。被験者には投げられたボールをセンター方向へ打ち返すように指示した。センターライン（ホームベースの捕手側の頂点とピッチャーマウンドの midpoint を結ぶ線）を中心に左右各 15°の範囲で打球が飛翔し、かつ被験者の自己評価が高い試技 4 本を分析対象とした。

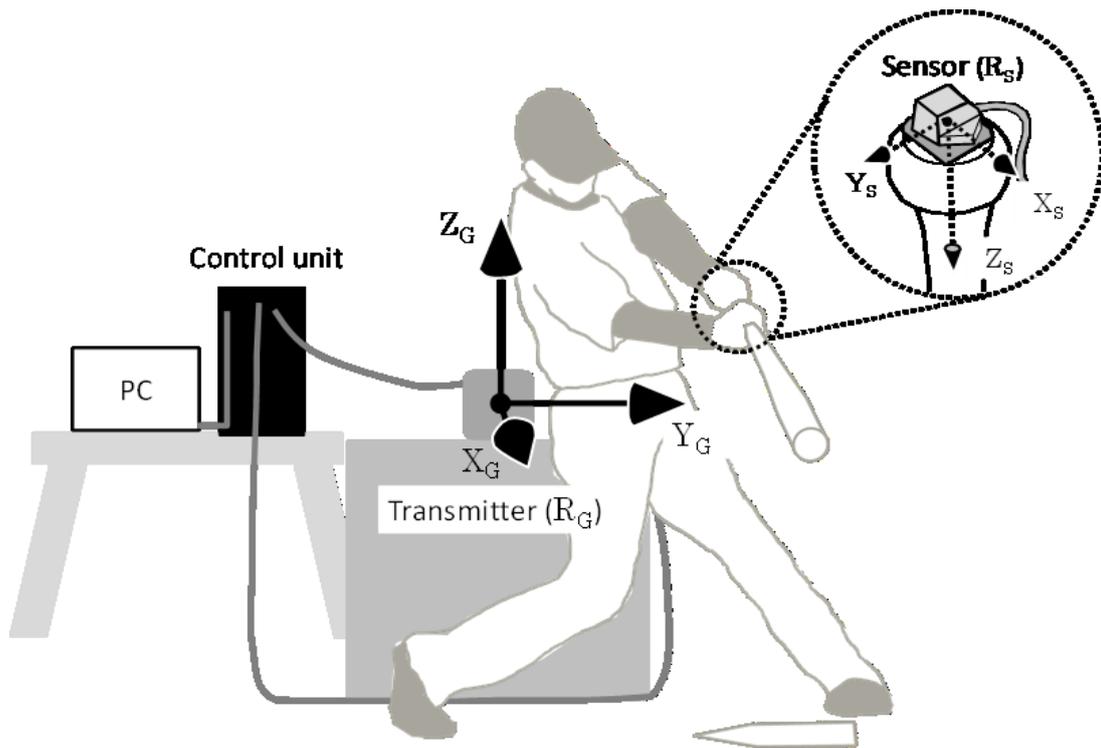


図 3-2 実験セッティング

## 2.3 データ処理

### 2.3.1 ローリング角速度・角変位の算出

バットに固定されたセンサ座標系の静止座標系に対する方位変化から、バットの角速度を算出した。まず、バットの  $n^{\text{th}}$  フレームの角速度を算出するために  $n-1^{\text{th}}$  フレームのセンサ座標系 ( $R'_S$ ) に対する  $n+1^{\text{th}}$  フレームのセンサ座標系 ( $R'''_S$ ) の方位  $A_{(R'''_S/R'_S)}$  を以下の式を用いて算出した (式 3-1)。

$$A_{(R'''_S/R'_S)} = A_{(R'_S/R_G)}^T \cdot A_{(R'''_S/R_G)} \quad (\text{式 3-1})$$

ここで  $A_{(R'''_S/R_G)}$  と  $A_{(R'_S/R_G)}$  は  $n+1^{\text{th}}$  フレームと  $n-1^{\text{th}}$  フレームのセンサ座標系の静止座標系に対する方位を表す  $3 \times 3$  の回転行列をそれぞれ示しており、各軸の方向を示す単位ベクトルは配列が  $3 \times 1$  の列ベクトルで配列されている (以下、全ての回転行列は同様の配列で表

した). 次に, 式 3-1 からバットの  $R'_S$  から  $R'''_S$  へ回転した時の回転角度 ( $\Delta\theta$ ) と回転軸 ( $\mathbf{u}'$ ) を

以下の式を用いて算出した (Haug 1992).  $A_{(R'''_S/R'_S)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$  とすると, 回転角度とその軸は以下の式によって算出することができる.

$$\Delta\theta = \cos^{-1}\left(\frac{a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1}{2}\right) \quad (\text{式 3-2})$$

$$\mathbf{u}' = \begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \\ u'_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \sin \Delta\theta} \begin{bmatrix} a_{32} - a_{23} \\ a_{13} - a_{31} \\ a_{21} - a_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-3})$$

回転軸を示すベクトル ( $\mathbf{u}'$ ) は  $n-1^{\text{th}}$  フレームにおけるセンサ座標系 ( $R'_S$ ) について表したものであるため, (') を用いてそれを示した. 次に, 得られた回転角度変化から角速度の大きさ ( $\dot{\theta}$ ) を算出し, その後角速度ベクトルを以下の式を用いて算出した.

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{(1/120)} \quad (\text{式 3-4})$$

$$\boldsymbol{\omega}' = \dot{\theta} \cdot \mathbf{u}' = \dot{\theta} \cdot \begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \\ u'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} u'_x \\ \dot{\theta} u'_y \\ \dot{\theta} u'_z \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-5})$$

算出された角速度ベクトルは  $n^{\text{th}}$  フレームにおける角速度を  $n-1^{\text{th}}$  フレームにおけるセンサ座標系 ( $R'_S$ ) について表したものである. 最後にこれを  $n^{\text{th}}$  フレームのバットに固定されたセンサ座標系について表すため, 以下の式を用いて座標系の変換を行った.

$$\boldsymbol{\omega}'' = A_{(R''_S/R_G)}^T \cdot A_{(R'_S/R_G)} \cdot \boldsymbol{\omega}'$$

$$\boldsymbol{\omega}'' = \begin{bmatrix} \omega_x'' \\ \omega_y'' \\ \omega_z'' \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-6})$$

角速度ベクトル ( $\boldsymbol{\omega}''$ ) は  $n^{\text{th}}$  フレームのセンサ座標系 ( $R_S''$ ) について表したものであるため、( ") を用いてそれを示した。また、 $A_{(R_S''/R_G)}$  は静止座標系における  $n^{\text{th}}$  フレームのバットに固定されたセンサ座標系の方位を表す  $3 \times 3$  の回転行列である。  $\omega_z''$  を  $n^{\text{th}}$  フレームにおけるローリング角速度とし、  $\omega_x''$  と  $\omega_y''$  の合成を同フレームにおけるスイング角速度とした。また、バットのローリングの角変位を算出するために、バットのローリング角速度を  $n^{\text{th}}$  フレームから  $n+1^{\text{th}}$  フレーム間 (1/240 秒間) を一定の値とみなし、区分解積分法を用いてインパクト前の 300 ms 間について数値積分した。

### 2-3-2 バットの角運動量の算出

バットの重心まわりの角運動量 ( $\mathbf{H}''$ ) を式 3-6 より求めたバットの角速度ベクトル ( $\boldsymbol{\omega}''$ ) とバットの主慣性モーメントから算出した。バットの短軸まわりの主慣性モーメント ( $I_x''$ ,  $I_y''$ ) は、バットを振り子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に平行軸の定理を用いて算出した ( $4.7 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ )。また、長軸まわりの主慣性モーメント ( $I_z''$ ) は、バットを半径の異なる 5 cm 長の円柱を連結した単一密度の物体とみなして算出した ( $3.44 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ )。なお、各円柱の半径は、バット長軸に沿って 5 cm 毎に計測した円周を  $2\pi$  で除した値とした。以下の式を用いて、角運動量を算出し、静止座標系について表した。

$$\mathbf{H}'' = \begin{bmatrix} I_x'' & 0 & 0 \\ 0 & I_y'' & 0 \\ 0 & 0 & I_z'' \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega}''$$

$$\mathbf{H} = A_{(R_S''/R_G)} \cdot \mathbf{H}''$$

(式 3-7)

### 2.3.3 二つのメカニズムに起因するローリング角速度の各成分の算出

ローリング角速度を生成する 2 つのメカニズムの貢献を明らかにするために、逆動力学的にそれぞれのメカニズムに起因する角速度を算出した。オイラーの運動方程式を用いて、バットに作用するモーメントを表すと下記の式となる (Hibbeler 2013)。

$$\mathbf{M}'' = \dot{\mathbf{H}}'' + \boldsymbol{\omega}'' \times \mathbf{H}''$$

$$\begin{bmatrix} M_x'' \\ M_y'' \\ M_z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x'' \dot{\omega}_x'' + (I_z'' - I_y'') \omega_z'' \omega_y'' \\ I_y'' \dot{\omega}_y'' + (I_x'' - I_z'') \omega_x'' \omega_z'' \\ I_z'' \dot{\omega}_z'' + (I_y'' - I_x'') \omega_y'' \omega_x'' \end{bmatrix}$$

(式 3-8)

式 3-8 では、 $M_z''$  がバットの長軸まわりに作用するモーメントを表している。なお、バットは軸対称な物体であるため、 $I_x'' = I_y''$  であり、 $I_x'' - I_y'' = 0$  となる。したがって、バットの長軸まわりに作用するモーメントは下記の式によって表される。

$$M_z'' = I_z'' \dot{\omega}_z''$$

(式 3-9)

式 3-9 で用いられているセンサ座標系のバットの角加速度 ( $\dot{\omega}_z''$ ) を、オイラー角を用いて表す。ある時刻におけるバットの姿勢は、静止座標系からバットに固定されたセンサ座標系への変換を定められた順序で連続して行う 3 つのオイラー角を用いて表すことができる。回転の順序は、はじめに静止座標系と一致する移動座標系  $R_{S0}$  ( $X_{S0}$ ,  $Y_{S0}$ ,  $Z_{S0}$ ) を  $Z_{S0}$  軸まわりに  $\alpha$  回転させ、次に 1 回目の回転で得られた座標系  $R_{S1}$  ( $X_{S1}$ ,  $Y_{S1}$ ,  $Z_{S1}$ ) を  $X_{B1}$  軸まわりに  $\beta$  回転させ、最後に 2 回目の回転で得られた座標系  $R_{S2}$  ( $X_{S2}$ ,  $Y_{S2}$ ,  $Z_{S2}$ ) を  $Z_{B2}$  軸まわりに  $\gamma$  回転させた (図 3-3)。

$$\mathbf{A}_{(R_{S1}/R_{S0})} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{(R_{S2}/R_{S1})} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S2})} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S0})} = \mathbf{A}_{(R_{S1}/R_{S0})} \cdot \mathbf{A}_{(R_{S2}/R_{S1})} \cdot \mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S2})}$$

$$\mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S0})} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}$$

(式 3-10)

$\mathbf{A}_{(R_{S1}/R_{S0})}$ は1回目の回転で得られた座標系  $R_{S1}$  の回転行列を、 $\mathbf{A}_{(R_{S2}/R_{S1})}$ は2回目の回転で得られた座標系  $R_{S2}$  の回転行列を、 $\mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S2})}$ は3回目の回転で得られた座標系  $R_{S3}$  の回転行列をそれぞれ示している。また、 $\mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S0})}$ は座標系  $R_{S0}$  に対する  $R_{S3}$  の回転行列を示している。静止座標系に対するセンサ座標系の方位 $\mathbf{A}_{(R_S/R_G)}$ と  $R_{S0}$  に対する  $R_{S3}$  の方位が一致することから、静止座標系に対するセンサ座標系の方位は以下のようにも表せる。

$$\mathbf{A}_{(R_S/R_G)} = \mathbf{A}_{(R_{S3}/R_{S0})}$$

$$\mathbf{A}_{(R_S/R_G)} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

(式 3-11)

式 3-10 と式 3-11 より  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  をそれぞれ算出することができる。

$$\alpha = \tan^{-1}(b_{13}/b_{23})$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\sqrt{b_{13}^2 + b_{23}^2}/b_{33}\right)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(b_{31}/b_{32})$$

(式 3-12)

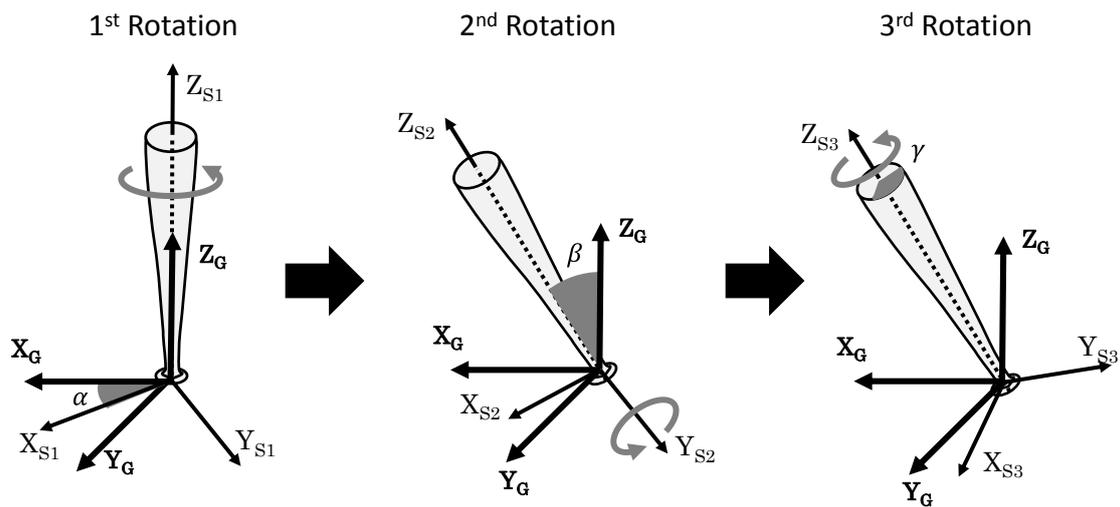


図 3-3 オイラー角の定義. 静止座標系と一致する仮想座標系  $R_{B0}$  ( $X_{B0}$ ,  $Y_{B0}$ ,  $Z_{B0}$ ) を  $Z_{B0}$  軸まわりに  $\alpha$  回転させた角度を第 1 角, 1 回目の回転で得られた仮想座標系  $R_{B1}$  ( $X_{B1}$ ,  $Y_{B1}$ ,  $Z_{B1}$ ) を  $X_{B1}$  軸まわりに  $\beta$  回転させた角度を第 2 角, 2 回目の回転で得られた仮想座標系  $R_{B2}$  ( $X_{B2}$ ,  $Y_{B2}$ ,  $Z_{B2}$ ) を  $Z_{B2}$  軸まわりに  $\gamma$  回転させた角度を第 3 角とした.

これら姿勢を表すオイラー角の 3 つの角度の時間微分は,  $\dot{\alpha}$  を歳差運動,  $\dot{\beta}$  を章動,  $\dot{\gamma}$  を自転として表す.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  はそれぞれ座標系  $R_{S0}$ ,  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$  について表されたものであるので, 座標系  $R_{S3}$  について表すようにそれぞれ座標変換をし, それらの和がバットに固定されたセンサ座標系におけるバットの角速度 ( $\omega''$ ) となる (Andrews 1995).

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}'' &= \begin{bmatrix} \omega_x'' \\ \omega_y'' \\ \omega_z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{(R_{B3}/R_{B2})}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{(R_{B3}/R_{B2})}^T \mathbf{A}_{(R_{B2}/R_{B1})}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\cos \gamma \sin \beta & \sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma \sin \beta & \cos \gamma & 0 \\ \cos \beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\alpha} \cos \gamma \sin \beta + \dot{\beta} \sin \gamma \\ \dot{\alpha} \sin \gamma \sin \beta + \dot{\beta} \cos \gamma \\ \dot{\alpha} \cos \beta + \dot{\gamma} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

(式 3-13)

この内の $\omega_z''$ を時間について微分すると $\dot{\omega}_z''$ が求められる。

$$\dot{\omega}_z'' = \ddot{\alpha} \cos \beta - \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \beta + \ddot{\gamma}$$

(式 3-14)

式 3-14 で算出されたバットの角加速度を式 3-9 に代入し、バットの長軸まわりに作用するモーメント (式 3-9) を表すと下記のようになる。

$$M_z'' = I_z'' \dot{\omega}_z'' = I_z'' \ddot{\gamma} + I_z'' \ddot{\alpha} \cos \beta - I_z'' \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \beta$$

(式 3-15)

第 1 項、第 2 項はバットを長軸まわりに角加速させるモーメント (メカニズム 1:  $M1$ ) を表し、第 3 項はバットの角運動量に対して、バット長軸の向きが変化することにより生じるモーメント (メカニズム 2:  $M2$ ) を表している。2つのメカニズムに起因する角速度の成分を算出するために、式 3-15 をバット長軸まわりの慣性モーメントで除した後、 $n^{\text{th}}$  フレームから  $n+1^{\text{th}}$  フレーム間 (1/240 秒間) を一定の値とみなし、区分解積分法を用いてインパクト前の 300ms 間について数値積分した。

$$\omega_z^{M1} = \sum_{t=-300ms}^0 \frac{1}{240} (\ddot{\gamma} + \ddot{\alpha} \cos \beta)$$

(式 3-16)

$$\omega_z^{M2} = \sum_{t=-300ms}^0 \frac{1}{240} (-\dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \beta)$$

(式 3-17)

## 2-4. データ分析

高速度カメラによって撮影された動画より、全ての被験者においてインパクト前の約300ms 時点において踏み出し足が接地していたことから、インパクトの300ms 前をスイング開始の瞬間と定義し、スイング開始からインパクト直前までを分析区間とした。なお、インパクトを定義するフレームは、バットに装着したセンサのデータがインパクトの振動によって連続的な増減から逸脱したデータが得られたフレームとした(図3-4)。分析区間におけるローリング角速度、ローリング角変位、バットの角運動量、および2つのメカニズムに起因するローリング角速度の各成分を分析対象とした。なお、全打者を右打者とみなせるように各座標系における座標値のy成分を反転させる鏡像変換を行なった。

また、各算出項目において、分析対象とした4試技の平均値を各被験者の代表値とした。そして、各算出項目において全被験者の平均値と標準偏差を算出した。

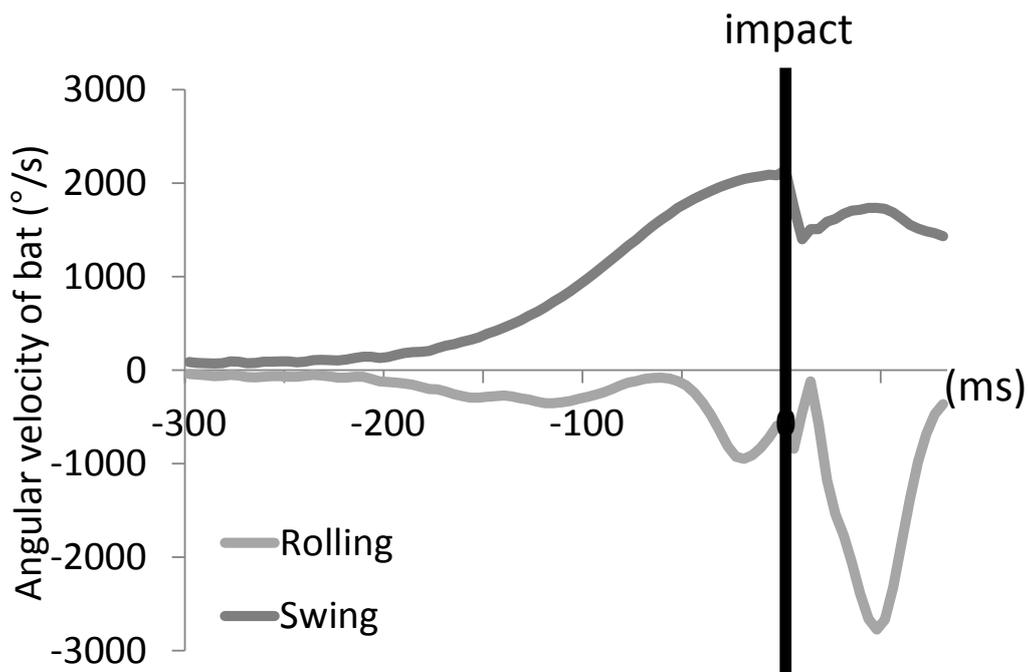


図3-4 インパクトの瞬間の定義. バットの角速度が連続的な増減から逸脱するフレームの直前をインパクト直前のフレームとして定義した。

### 3.結果と考察

#### 3.1 ローリング角速度とローリング角度 (図 3-5)

スイング開始からインパクト直前までのローリングの角度変化量はトップスピン方向に  $69.5 \pm 18.3^\circ$  であった。ローリング角速度はインパクトの 100ms 前から急激に増加し始め、インパクト直前のローリング角速度はトップスピン方向に  $737.6 \pm 148.9^\circ/\text{s}$  であり、最大値と最小値はトップスピン方向にそれぞれ  $1101.8^\circ/\text{s}$  と  $561.7^\circ/\text{s}$  であった。これらの結果はローリング角速度とローリング角度は、本研究の全ての被験者において、スイング中にトップスピン方向へのローリングが生じていることを示すものであった。

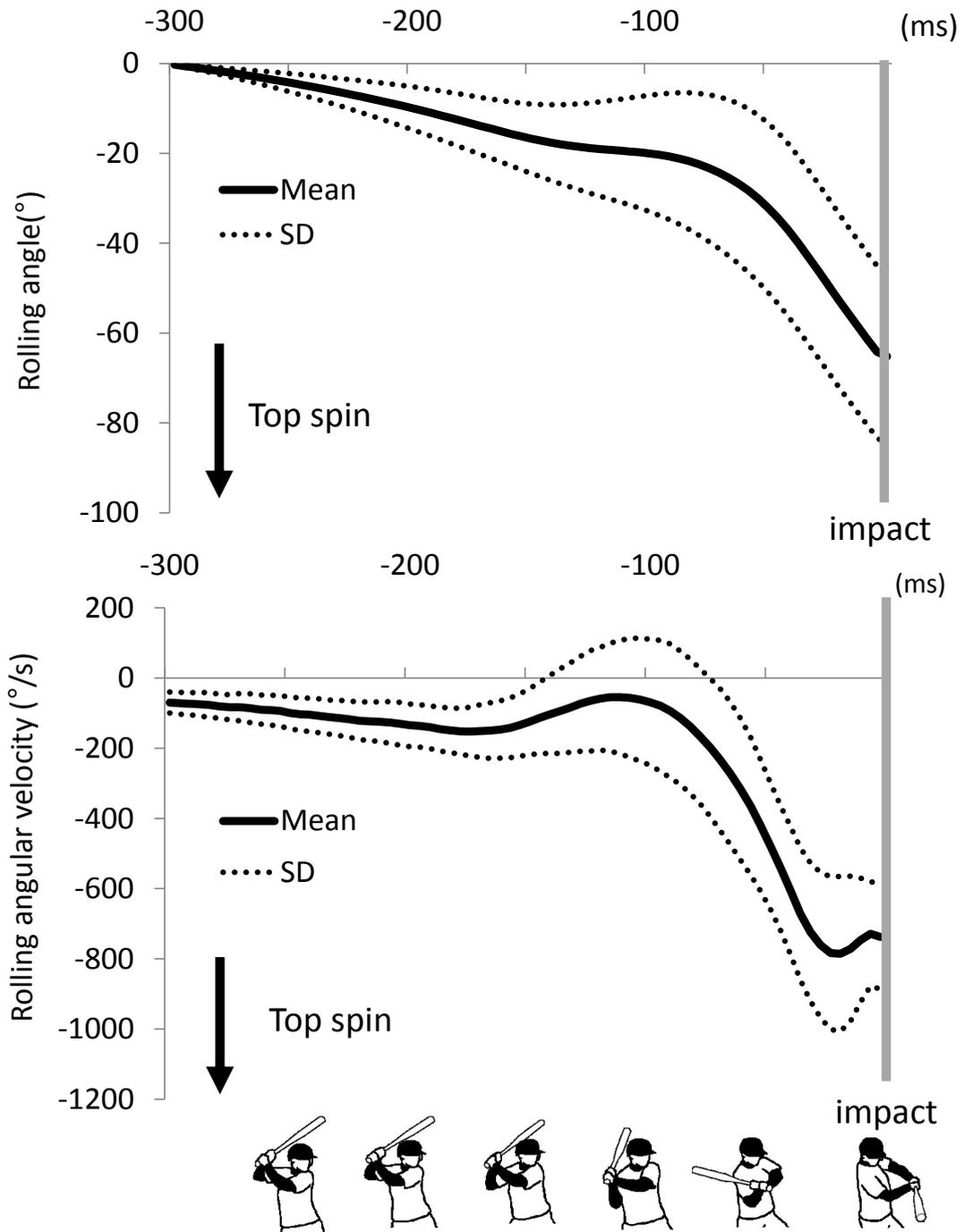


図 3-5 ローリング角度（上段）とローリング角速度（下段）

### 3.2 バット重心まわりの角運動量

バット重心まわりの角運動量を示す (図 3-6). スイング開始から  $X_G$  軸まわりの角運動量, および  $Z_G$  軸まわりの角運動量が増加し, インパクト直前 (-50~0ms) では  $Z_G$  軸まわりの角運動量のみが増加した. 一方で,  $Y_G$  軸まわりの角運動量は他の成分の角運動量と比較するとスイング中の変化が小さく, その値も小さかった. インパクトの 100ms 前までに  $X_G$  軸まわりの角運動量が大きくなるのは, スイング開始時に鉛直方向を向いていたバットを, インパクトに向けて水平に近づけるためにバットヘッドを捕手側に倒す動作によるものであると考えられる. インパクト直前の  $Z_G$  軸まわりの角運動量の増加は, インパクトに向けて鉛直軸まわり ( $Z_G$  軸まわり) の角運動量が急激に増加するという宮西 (2006) の研究の結果を支持するものであり, バットのヘッド速度を大きくすることに貢献すると考えられる.

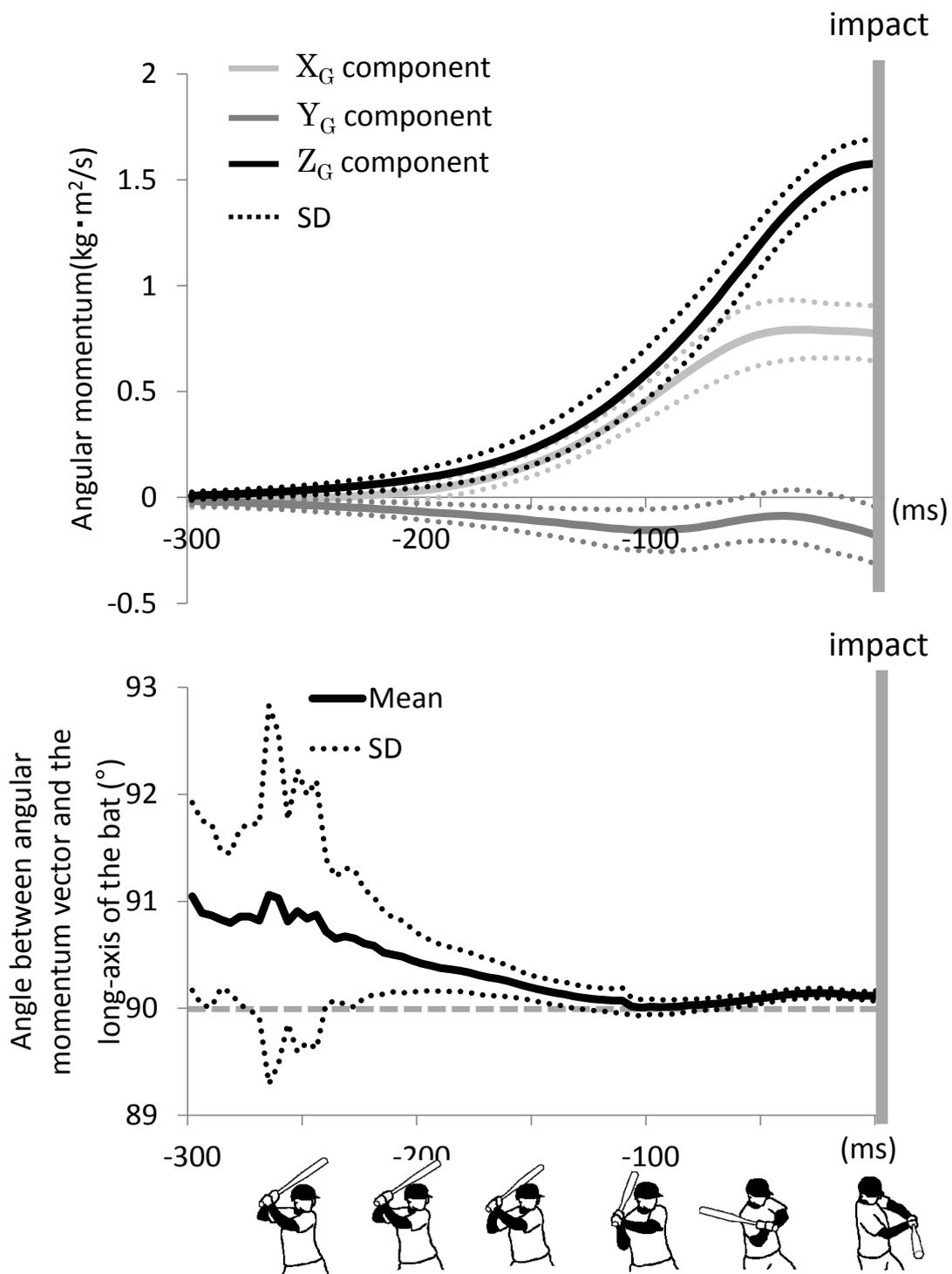


図 3-6 静止座標系について表されたバット重心まわりの角運動量の各成分（上段）およびバット重心まわりの角運動量ベクトルとバット長軸のなす角度（下段）の経時変化

メカニズム 2 の規定因子であるバット長軸 ( $Z_S$ ) に対する角運動量ベクトルの向きを図 3-6 に表す。全被験者の平均値は、スイングを通じて  $90^\circ$  を上回っていたが、個人差の大きい前半 ( $-300 \sim -100$  ms) とほぼ全員が一致する後半 ( $-100$  ms ~ インパクト直前) にわけられる。スイング前半では角運動量ベクトルとバット長軸のなす角度は  $91^\circ$  から  $90^\circ$  まで減少していた。この区間には大きな個人差が観察されるが、これは、バットのスイング角速度 ( $\omega_x$  と  $\omega_y$  を合成した成分) およびローリング角速度 ( $\omega_z$ ) が共に極めて小さいため、微小であってもどちらかの角速度に個人差が生じた場合に角速度ベクトルの方向が大きく変化するためである (図 3-7)。スイング後半 ( $-100$  ms 以降) では、角運動量ベクトルとバット長軸のなす角度は  $90^\circ$  から  $90.27 \pm 0.08^\circ$  へと増加した。この増加幅は極めて小さい値として算出されたのであるが、この増加はバット長軸に対するバットの角速度ベクトルの角度増加 ( $90^\circ \Rightarrow 110^\circ$ ) に起因するため、計測誤差ではないことは明らかである。すなわち、長軸まわりの主慣性モーメント ( $6.44 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) が短軸まわりの主慣性モーメント ( $470 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) に対して非常に小さい (約  $1/80$ ) ため、角速度ベクトルと主慣性モーメントの積として算出される角運動量ベクトルのバット長軸成分が極めて小さくなり、角度変化が微小なものとなったのである。スイング後半に角運動量ベクトルとバット長軸のなす角度が増加することを示したこの結果は、この局面にメカニズム 2 がローリング角速度の獲得に貢献することを示唆するものである。

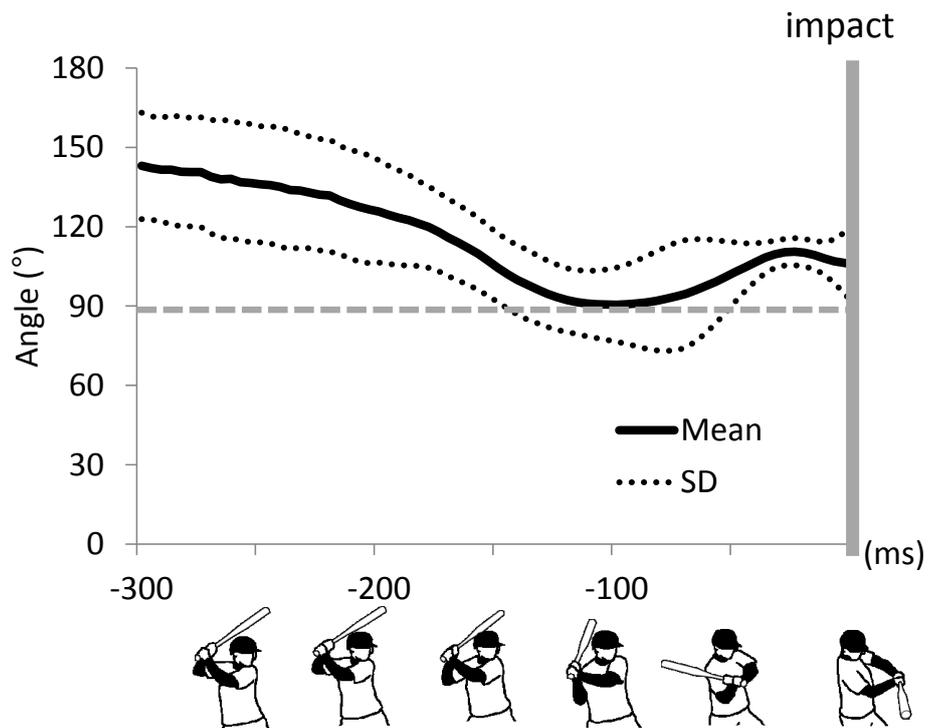


図 3-7 バット重心まわりの角速度ベクトルとバット長軸のなす角度

### 3.3 ローリングのメカニズム

バット長軸まわりにローリング方向への角力積をバットに加えることに起因するローリング角速度の成分（メカニズム 1）とバット長軸の向きが変化することに起因するローリング角速度の成分（メカニズム 2）のそれぞれについて経時変化を図 3-8 に示す。メカニズム 1 に起因するローリング角速度の成分はインパクトに向けてプラス方向（バックスピン方向）へ変化し、インパクト直前では  $1044.3 \pm 309.5/s$  を記録した。これは、打者がバットに加えた力の角力積がバックスピン方向のローリングを生じさせる方向に作用していたことを示すものである。つまり、打者はローリングとは逆方向のモーメントをバットの長軸まわりに加えていたのである。一方で、メカニズム 2 に起因するローリング角速度の成分はインパクトに向けてマイナス方向（トップスピン方向）に変化し、インパクト直前では-

1713.7±242.8°/s を記録した。これは、バット長軸の向きの変化に起因するメカニズム 2 が  
 トップスピンの方向のローリングを生じさせる方向に作用していたことを示すものである。  
 角運動量ベクトルはその方向や大きさが変化するが、このベクトルに対してバット長軸は  
 直交せず、両者のなす角度が 90°を越える角度を保つように変化することによってローリン  
 グが生じていたのである。

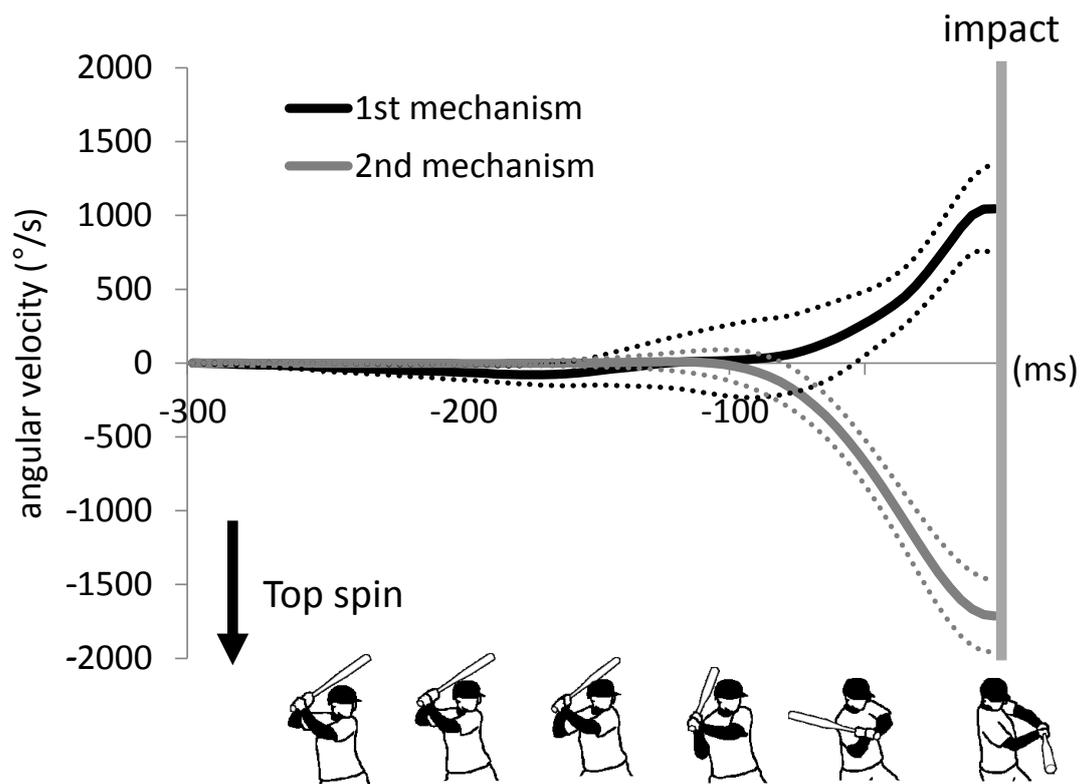


図 3-8 2つのメカニズムに起因する角速度の経時変化.

この結果は、打者のバット長軸への直接的な動作によってトップスピン方向のローリン  
 グが生み出されていたのではないことを示すものである。すなわち、トップスピン方向のロ  
 ーリングは両前腕を同時に長軸まわりに回転させる「リストターン」という動作によって生  
 み出されるわけではないという第 2 章の結果をサポートするものである。トップスピン方

向のローリング角速度は、歳差運動の角速度（バット長軸を鉛直軸周りに回転させるスイングの速度）、章動の角速度（鉛直姿勢から下方に倒すような角速度）、および章動角（鉛直軸とバット長軸のなす角度）によって規定される（式 3-17）。この内、歳差運動の角速度はスイング開始からインパクトに向けて約  $2500^{\circ}/s$  まで断続的に増加していたが、章動の角速度はインパクト前の  $100ms$  から約  $1000^{\circ}/s$  まで増加したものの、インパクト直前では  $0^{\circ}/s$  まで減速していた（図 3-9）。これら角速度変化の影響を式 3-17 をもとに考察すると、歳差運動の角速度の増加は、たとえ章動の角速度に変化がない場合においても、トップスピン方向へのローリング角加速度の増加をもたらすことがわかる。したがって、観察された歳差運動の角速度の断続的な増加は、トップスピン方向のローリング角速度の増加に大きく貢献したものと考えられる。一方で、章動の角速度の増減は、トップスピン方向の角加速度の変化をもたらすが、インパクトの  $50ms$  前から  $5ms$  前までの急激な減少が負の方向への角速度に達しなかったため、トップスピン方向のローリング角速度の増加に小さいながらも貢献したと考えられる。しかしながら、インパクト直前の  $5 \pm 4ms$  間において、章動の角速度は負の値となった。章動の角速度が負の値になることによって、メカニズム 2 に起因するトップスピン方向のローリング角速度の成分は減少するが、この区間における減少は、約  $30^{\circ}/s$  ( $33.6 \pm 44.8^{\circ}/s$ ) 程度とわずかなものであった。以上より、トップスピン方向に大きなローリング角速度を獲得するためには、打者はインパクトまでに、バット長軸を鉛直軸まわりに角加速させ、スイング速度（歳差運動）を大きくすることが重要であると考えられる。また、インパクトに向けてバットヘッドがグリップエンドに対して下方へ移動し続け、インパクト時にはバットヘッドがグリップエンドに対して下方へ傾くように（章動の角速度が正の値）スイングすることも、大きなローリング角速度を得るためには重要であることが示唆された。

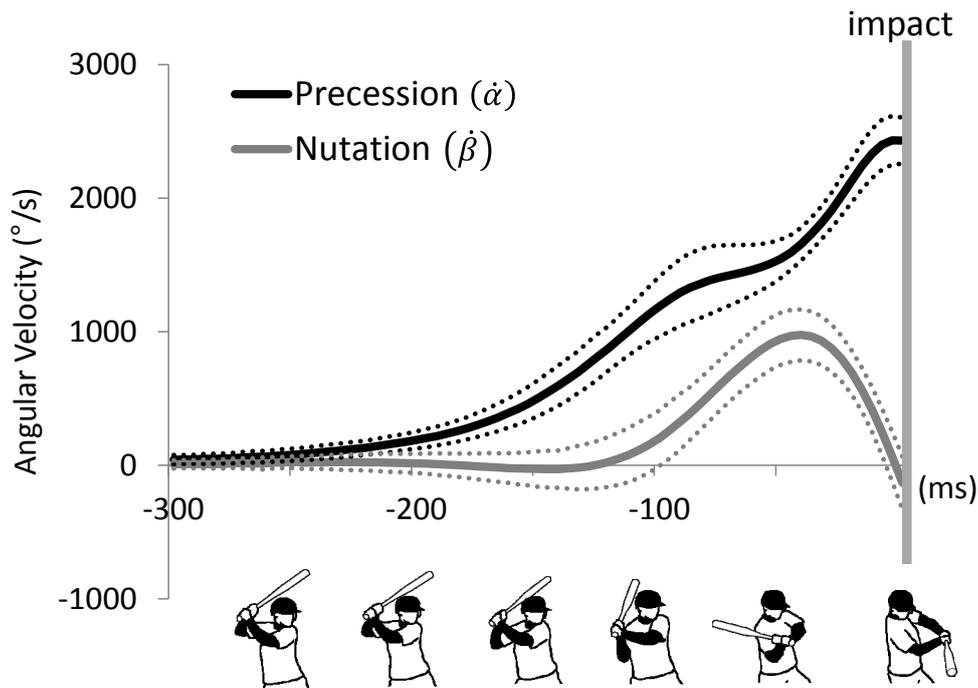


図 3-9 バットの歳差運動と章動の角速度の経時変化.

バットのトップスピン方向のローリングは、メカニズム 2 に起因するトップスピン方向のローリングに、ブレーキとしてメカニズム 1 が作用することによって生じていたことが明らかになった。式 3-15 からバットの長軸まわりに作用したモーメントをそれぞれ算出すると、インパクト直前では、歳差運動や章動による成分（第 2 項と第 3 項）はトップスピン方向のモーメントを作用させていたのに対し、打者によって加えられたモーメントはバットにバックスピン方向の自転成分（第 1 項）を与えていた（図 3-10）。阿江ら（2013）によると、スイング中にバットの長軸まわりには、左右の手によって異なる方向にモーメントが作用しており、右打者の場合、左手（引手）でバックスピン方向のモーメント、右手（押手）でトップスピン方向のモーメントをそれぞれ作用させていることが報告されている。つまり、引手によってトップスピン方向のローリングにブレーキがかけられていることがわかる。スイング中の打者の前腕の動きに着目すると、引手の前腕回外がトップスピン方向のロ

ローリングを生み出す動きであると前章では考察した。しかしながら、スイング中の上肢キネマティクスを報告した川村ら (2008) の研究によると、引手の前腕回内回外の角度は、ほとんど変化していないことが読み取れる。また、第 2 章の前腕回外角度変化量 (20°) と本章でのローリング角度変化量 (70°) を比べると、ローリングの角度変化量に対して、前腕回外の角度変化量が小さいことがわかる。この約 50° の差分は、スイング中の肩関節外旋や手関節の掌屈によって補われていると考えられる。すなわち、歳差運動や章動によるトップスピン方向のモーメントによってトップスピン方向にローリングしようとするバットに対して、引手前腕の回外方向への角度変化が小さいために、引手がブレーキとなってしまう、自転の成分がバックスピン方向のモーメントになっていたと考えられる。つまり、ローリングに貢献し得ると考えられた引手前腕の回外は、バットをローリングさせるための運動ではなく、バットがローリングすることによって受動的に前腕が回外方向へ回転したことを示唆するものである。このようなブレーキとなる動作を小さくし、ローリング角速度を大きくするための方策については、身体運動とともに今後検討していく必要があると考えられる。

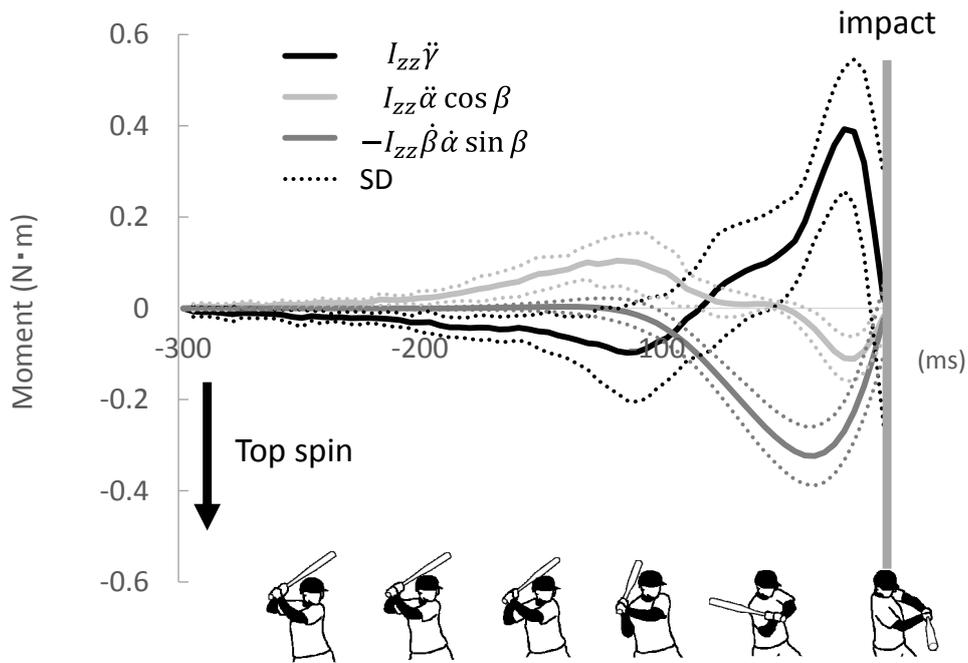


図 3-10 式 3-15 の各項が表すバットに作用するモーメントの経時変化

### 3.4 計算式の妥当性検証

メカニズム 1 (式 3-16) とメカニズム 2 (式 3-17) に起因するローリング角速度の成分の和は、算出されたバットのローリング角速度と一致するはずである。これを確認するために 2 つのメカニズムによって生成されたローリング角速度の成分の和とバットの角速度のバット長軸成分 ( $\omega_z$ : ローリング角速度) の経時変化の平均値を図 3-11 に示す。経時変化における相互相関係数は 0.999 であった。また、インパクト直前における 2 つのメカニズムに起因するローリング角速度成分の和は  $-739.3 \pm 175.0\%/s$  であり、センサ座標系の方位変化から実際に算出したローリング角速度は  $-737.6 \pm 148.9\%/s$  であった。これらより、ローリング角速度を生成する 2 つのメカニズムの貢献を前述した式 (式 3-16・式 3-17) で定量する方法は妥当であったと考えられる。

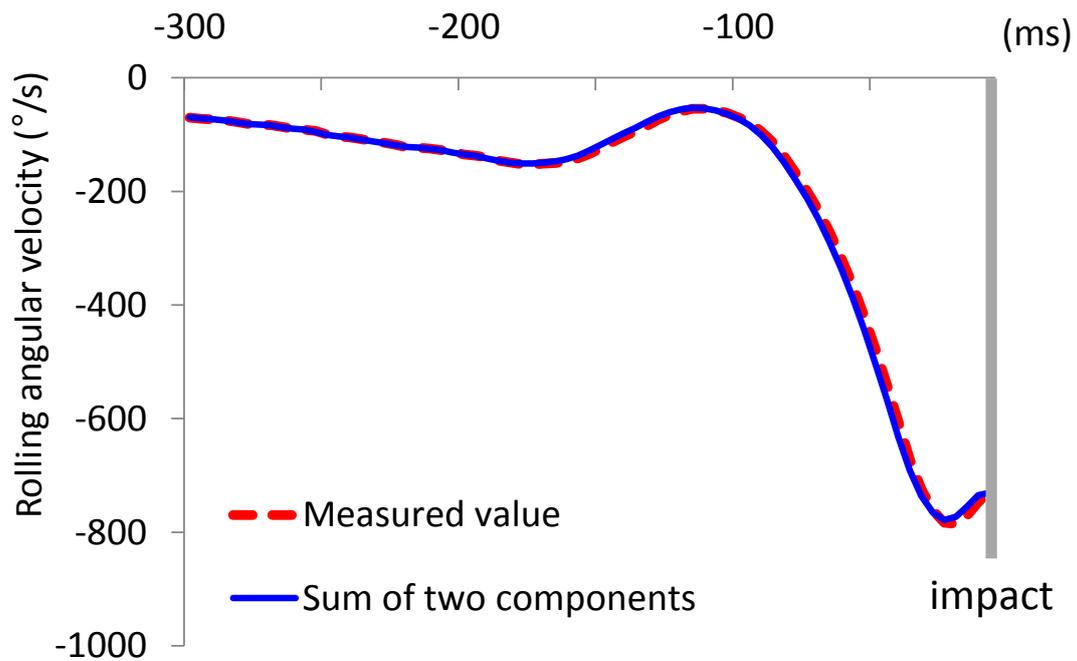


図 3-11 計算式の妥当性. 計測されたローリング角速度と 2 つのメカニズムに起因する角速度の和それぞれの経時変化

### 3.5 分析結果の妥当性検証

引手のモーメントを小さくすることによって、実際にローリング角速度が大きくなるのかを検証した。通常のバットを用いたスイング（条件 1）と引手のモーメントが小さくなるように潤滑剤を用いて細工したバット（図 3-12）を用いたスイング（条件 2）を野球経験者 1 名にそれぞれティー打撃で 5 試技ずつ行わせた。その際のバットの運動を電磁ゴニオメータで計測した。

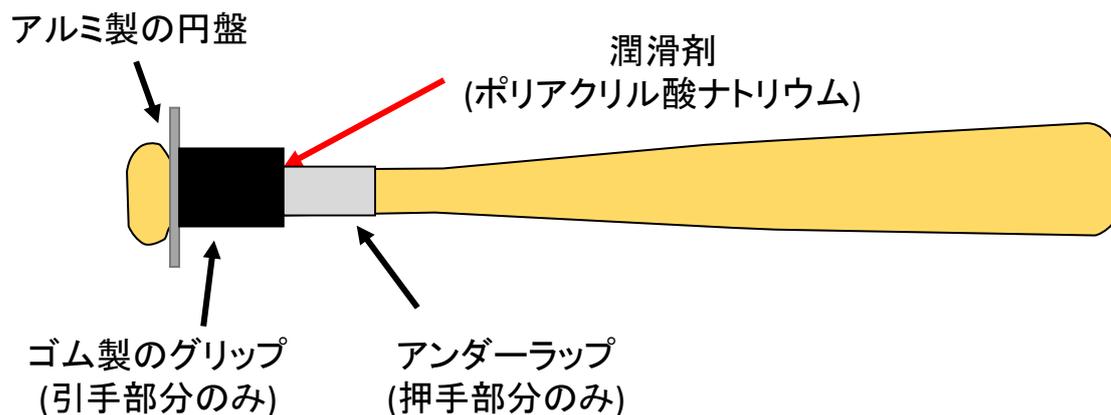


図 3-12 引手のモーメントが最小になるように細工したバット。潤滑剤をゴム製のグリップとバットの間注入した。潤滑剤の効果で通常グリップでは手から抜けてしまうので、アルミ製の円盤をバットに取り付けることによって、それをグリップエンドとした。また、押手の部分では潤滑剤が漏れてしまう可能性があったため、アンダーラップを巻き、押手に潤滑剤が触れないように留意した。

その結果、インパクト直前におけるローリング角速度は、条件 1 が  $1275.2^\circ/\text{s}$ 、条件 2 が  $1662.0^\circ/\text{s}$  であった。各メカニズムに起因する角速度を算出したところ、条件 1 ではメカニズム 1 に起因する角速度が  $-531.3 \pm 304.0^\circ/\text{s}$ 、メカニズム 2 に起因する角速度が  $1806.5 \pm 92.4^\circ/\text{s}$  であり、条件 2 ではメカニズム 1 に起因する角速度が  $195.5 \pm 249.7^\circ/\text{s}$ 、メカニズム 2 に起因する角速度が  $1466.5 \pm 125.2^\circ/\text{s}$  であった。スイング中のメカニズム 1 によるモーメントをみると、インパクト直前では両条件ともにトップスピン方向のモーメントを示していた。しかしながら、通常のスイング (条件 1) ではインパクトの 70ms 前から 20ms 前までの期間に潤滑剤入りバットを用いたスイング (条件 2) に比べて大きなバックスピン方向のモーメントが作用していた (図 3-13)。これは、潤滑剤入りのバットによって引手によるバックスピン方向のモーメントを減少させることができたことを示すものである。インパクト直前にトップスピン方向のモーメントがみられるのは、押手によるトップスピン方向のモーメントが大きくなったためであると考えられる。またこの打者は、通常のスイングにおいても高いローリングを獲得していた。これは、この打者の通常のスイングの特徴とし

てインパクト直前の押手のトップスピン方向のモーメントが，引手のバックスピン方向のモーメントよりも大きくなることで，バットに作用する長軸まわりのモーメントがトップスピン方向となり，メカニズム 1 に起因するローリング抑制作用が小さくなった結果，大きなローリング角速度を獲得していることを示すものである。

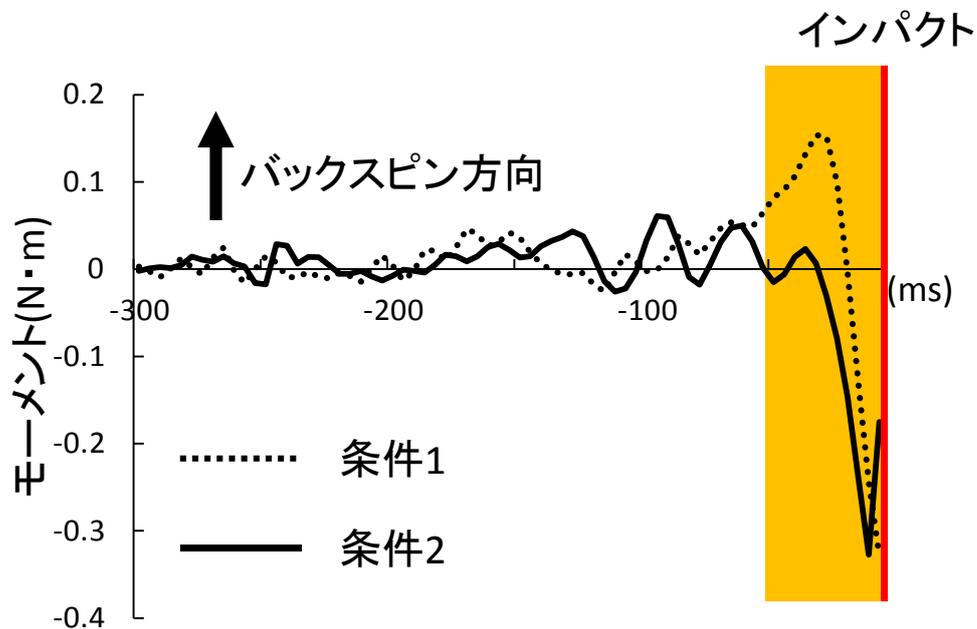


図 3-13 通常のバットを用いたスイング（条件 1）と引手のモーメントが小さくなるように細工したバットを用いたスイング（条件 2）におけるバット長軸まわりに作用したモーメントの経時変化.

条件 2 では，メカニズム 2 に起因する角速度も小さくなっていたため（ $1466.5 \pm 125.2^\circ/\text{s}$ ：約  $340^\circ/\text{s}$  の減少），条件 1 で示したメカニズム 2 に起因する角速度（ $1800^\circ/\text{s}$ ）ほど速いローリング角速度が獲得されなかったと考えられる．メカニズム 2 に起因する角速度が小さくなってしまった原因として，バットの振りづらさが考えられる．引手の部分は，アルミ製の大きなグリップエンドがあるとしても潤滑剤によってグリップが長軸まわりに滑るため，通常のバットと同様にバットを加速させるのは比較的困難であったと推察される．

引手のモーメントが小さくなるように潤滑剤を用いて細工したバットを用いた打撃実験の結果は，引手の運動がバットのローリングに対してブレーキとなる動作であることを実

証するものである。さらに、ローリングに貢献し得ると考えられた引手前腕の回外がバットをローリングさせるための運動ではないことを示すものである。すなわち、この実証実験の結果は、トップスピン方向のローリングが両前腕を同時に長軸まわりに回転させる「リストターン」という動作によって生み出されるわけではないという第 2 章の結果、およびメカニズム 2 に起因するトップスピン方向のローリングにブレーキとしてメカニズム 1 が作用することによって生じていたという第 3 章の結果を裏付けるものである。また、この結果は、ローリングに対するブレーキとして引手がバットに加えたモーメントの反作用が、引手前腕を受動的に回外方向へ回転させることにより、リストターンを構成する引手前腕の運動が行われていることを示すものでもある。

#### 4.まとめ

野球のバッティングにおけるバットのトップスピン方向のローリングは、バット長軸が角運動量ベクトルに対して  $90^\circ$  を越える角度を保つような角速度を有することによって生じていることが示された。また、打者が直接バット長軸まわりに作用させる角力積は、バックスピン方向の回転を生じさせ、トップスピン方向のローリングに対してはブレーキとして作用することが示された。

## 第4章 野球の打撃におけるローリング角速度の個人差の力学的要因

### 1.はじめに

インパクト直前におけるローリング角速度は個人差が大きく、 $1700^\circ/\text{s}$ まで達する打者もいれば、 $20^\circ/\text{s}$ にも満たない打者がいることが報告されている(城所ら 2011)。このようにローリング角速度は個人差が大きいパラメータであるものの、その個人差が生じる力学的要因については明らかになっていない。ローリングの発生メカニズムに着目すると、バットのトップスピン方向のローリングに対して、打者がバット長軸まわりに作用させるモーメント(メカニズム 1)が負の貢献をし、バットの角運動量ベクトルに対してバット長軸の向きが変化することによって生じるモーメント(メカニズム 2)が正の貢献をしていることが、第3章で明らかとなった。ローリングの回転速度は上記した2つのメカニズムの和によって決定されるため、これらのメカニズムがローリング角速度の個人差に関連すると考えられる。そこで本研究では、ローリングの決定要因である2つのメカニズムとローリング角速度との関連を個人間で横断的に調べ、ローリング角速度に個人差が生じる力学的要因を明らかにすることを目的とした。ローリング角速度に個人差が生じるメカニズムを解明し、ローリング角速度が大きい打者のスイングの特徴を捉えることにより、ローリング角速度を高めるための実現可能な方法を提案することが本研究のねらいである。

## 2. 方法

### 2-1 被験者

被験者は、プロ野球選手 28 名 ( $25.9 \pm 4.4$  歳,  $178.3 \pm 5.1$ cm,  $79.3 \pm 7.2$ kg) であった。このうち右打者が 14 名, 左打者が 13 名, 両打ち打者が 1 名であった。なお, 右打者と左打者で結果を統一させるために, すべての打者を右打者とみなせるように, 左打者の値を変換して分析を行なった。本実験の実施にあたり, 早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会の承認を得た。被験者には, 事前に本研究の主旨および内容を十分に説明し, 書面による実験参加の同意を得た。

### 2-2 データ収集

バットの 3 次元運動は, 電磁ゴニオメータ (LIBERTY, POLHEMUS 社製, Colchester, VT) を用いて 240Hz で計測した。電磁ゴニオメータは, コントロールユニットと磁場を発生させるトランスミッタ, 磁場内でトランスミッタに対する位置・方位を計測する有線センサ, 先端の位置座標を計測するスタイラスによって構成されている。本実験では, 有線センサ 1 つを用いてバットの運動を計測した。トランスミッタは, 打撃中にバットや打者の体が触れないように打者の 30cm 後方, 高さ 90cm の位置に設置した。硬式用木製バット (2TW-10658MO, ミズノ社製, 84cm, 900g) のグリップエンドにセンサを装着した。バット座標系を定義するため, スタイラスを用いてバットヘッド先端面の中心をデジタルタイズし, センサに対するバットヘッドの位置座標を取得した。バットとボールのインパクト時の衝撃によるセンサへのダメージを防ぐため, 厚さ 5mm の衝撃吸収パッドをバットとセンサの間に介した。また, センサのコードはバッティングの妨げとならないように, 打者の前腕と背中にサージカルテープを用いて貼付した。また, 2 台の高速カメラ (Phantom Miro, Vision Research 社製) を打者の斜め前方に設置し, 投球されたボールおよび打球の軌跡を撮影した (図 4-1 ; サンプルング周波数 : 2500Hz, 露光時間 :

0.35ms). 映像を3次元解析することにより、ピッチングマシンによる投球速度の計測と打撃された打球速度の計測をした。実験試技に先立って、4点の較正点が30cm間隔で固定されたポール17本(較正点68点)が放射状に取り付けられた較正器を撮影し、キャリブレーションを行った。また、ホームベースのキャッチャー側の角、ホームベースとマウンドを結ぶ線上の任意の点、左バッターボックスの任意の点それぞれに高さ90cmの位置に印がつけられた木製の棒を設置し、その印をコントロールポイントとして撮影した。

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、室内練習場にてマシン打撃を行わせた。ホームベースから規定の距離(18.44m)離れた位置に設置されたアーム式のピッチングマシンから硬式ボールを投じた。被験者には打ち返す方向を指示せず、一人につき8試技ずつ打撃させた。ピッチングマシンから投球されたボールの速度は、平均  $28.1 \pm 1.2$  m/s であった。

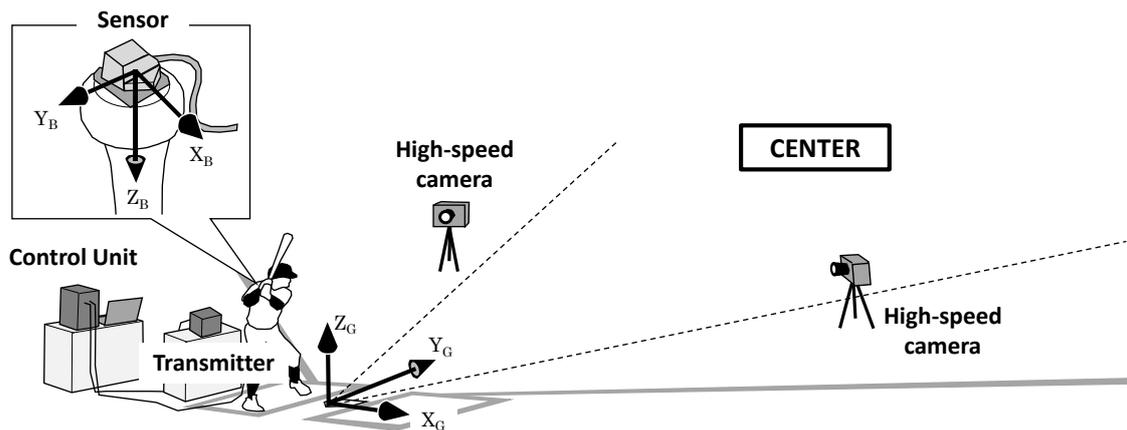


図 4-1 実験セッティング.

## 2.3 データ処理

### 2.3.1 打球速度の算出方法

3次元動作解析ソフト (Frame-DIASV, DKH 社製, Japan) を用いて 2 台の高速度カメラによって撮影された映像上のボール中心をデジタイズし, DLT 法 (Abdel-Aziz and Karara 1971) によってボールおよびバット 2 点 (ヘッドとグリップエンド) の 3 次元座標値を取得した. 室内での撮影であったため, 映像が暗くボールやバットを認識することが困難であった場合は, 撮影後に映像調節が可能なカメラ制御ソフト (PCC 2.14, Vision Research 社製) を用いて, ボールやバットが正確に識別できるように映像の感度やゲインを調節したうえで分析を行った. 映像中のコントロールポイント 3 点から静止座標系 ( $R_G: X_G, Y_G, Z_G$ ) を定義した.  $X_G$  を右打席から左打席へと向かうベクトル,  $Y_G$  をホームベースからピッチャーマウンドへ向かうベクトル,  $Z_G$  を鉛直上向きのベクトルとした. キャリブレーションによる標準誤差は  $X_G$  成分が 1.1mm,  $Y_G$  成分が 1.3mm,  $Z_G$  成分が 1.2mm であった. 打球速度は, インパクト直後 5 フレームにおける打球の変位をそれに要した時間 (4/2500 秒) で除すことにより算出した. また打球の飛翔方向は, 水平面に投影した成分のみをインパクト直後 10 フレーム分の打球の座標値から求めた回帰直線の傾きとして算出した. なお,  $Y_G$  を  $0^\circ$  とし,  $Y_G$  よりもライト側へ飛翔した打球を正の値として算出した.

### 2.3.2 バットの姿勢および角速度算出方法

スタイラスを用いて計測されたバットヘッドの座標値を用いて, バット座標系 ( $R_B: X_B, Y_B, Z_B$ ) を定義した. グリップエンドからバットヘッドへ向かうベクトルを  $Z_B$ ,  $Z_B$  に直交する面上に存在し, 互いに直交する任意のベクトルを  $X_B, Y_B$  とした. 電磁ゴニオメータの基準座標系 ( $R_{EM}: X_{EM}, Y_{EM}, Z_{EM}$ ) はトランスミッタの内部に定義されているため, 目視によるトランスミッタの方位調整では  $R_{EM}$  と  $R_G$  の向きを一致させることが困難であった. このトランスミッタの設置誤差によって生じる 2 つの座標系の方位誤差は, 同一の瞬間に

同一の物体を両方法論（ビデオ分析法と電磁ゴニオメータ法）で計測した際の差分として算出した。そして、この算出値を用いて  $R_{EM}$  を数学的に回転させることにより、両座標系が一致するように補正した。

インパクト時のバットの姿勢は、水平面上に投影したバット長軸と  $X_G$  とのなす角度をバットの水平角とし、バット長軸と水平面のなす角度をバットの鉛直角とした。バットの角速度は、第 3 章の方法と同様に静止座標系に対するバット座標系の方位変化から算出した。バットの  $n^{\text{th}}$  フレームの角速度を算出するために、まず  $n-1^{\text{th}}$  フレームのバット座標系に対する  $n+1^{\text{th}}$  フレームのバット座標系の方位を行列の演算により算出した。次に、算出された行列の因子を用いて 2 フレーム間 (1/120 秒) に回転したバットの回転軸とその軸まわりの回転角度を求めた。得られた回転角度を時間微分することによって角速度の大きさを求め、その角速度の大きさと回転軸から、角速度ベクトルを算出した。  $n^{\text{th}}$  フレームにおけるバットの角速度ベクトルを  $Z_B$  に投影した成分をローリング角速度とした。

### 2.3.3 メカニズム 1 およびメカニズム 2 に起因するローリング角速度の算出

2 つのメカニズムに起因するローリング角速度は、第 3 章と同様の方法を用いて算出した。オイラー角およびオイラーの運動方程式を用いて、バット長軸まわりに作用するモーメント ( $M_Z$ ) を表すと式 4-1 のように表すことができる。

$$M_Z = I_Z \ddot{\gamma} + I_Z \ddot{\alpha} \cos \beta - I_Z \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \beta \quad (\text{式 4-1})$$

$I_Z$  はバットの長軸まわりの主慣性モーメントを表している。  $\alpha$ 、  $\beta$ 、  $\gamma$  はそれぞれオイラー角の第 1 角（歳差運動の角度）、第 2 角（章動の角度）、第 3 角（自転の角度）を表している。また、記号上のドットは時間微分であることを示し、ドットの数によって時間微分の回数を示している。式 4-1 における第 1 項と第 2 項はバットを長軸まわりに角加速させるモー

ント（メカニズム 1）を表し，第 3 項はバットの角運動量に対してバット長軸の向きが変化することによって生じるモーメント（メカニズム 2）を表している．各メカニズムに起因するローリング角速度を算出するために，式 4-1 をバット長軸まわりの慣性モーメントで除した後に，インパクト前の 300ms 間について区分求積法を用いて数値積分した（式 4-2，式 4-3）．

$$\omega^{M1} = \frac{1}{240} \sum_{t=-300ms}^0 (\dot{\gamma} + \ddot{\alpha} \cos \beta)$$

(式 4-2)

$$\omega^{M2} = \frac{1}{240} \sum_{t=-300ms}^0 (-\dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \beta)$$

(式 4-3)

$\omega$  はそれぞれのメカニズムに起因するローリング角速度を示しており，上付きの文字を用いて各メカニズム（ $M1$ ：メカニズム 1， $M2$ ：メカニズム 2）を表している．

## 2.4 データ分析

各打者についてセンター方向（ $Y_G$  を中線とし， $\pm 15^\circ$  の範囲）へ飛翔した打球のうち，最も打球速度が大きかった試技を分析対象とした．ローリング角速度および各メカニズムに起因する角速度については，インパクト直前のフレームの値を用いた．なお，インパクトを定義するフレームは，バットの角速度がインパクトの衝撃によって，連続的な増減から逸脱したフレームとした．また，バット座標系の定義からトップスピン方向のローリングが負の値として算出されるので，トップスピン方向の回転が正となるように算出値の符号を反転させた．

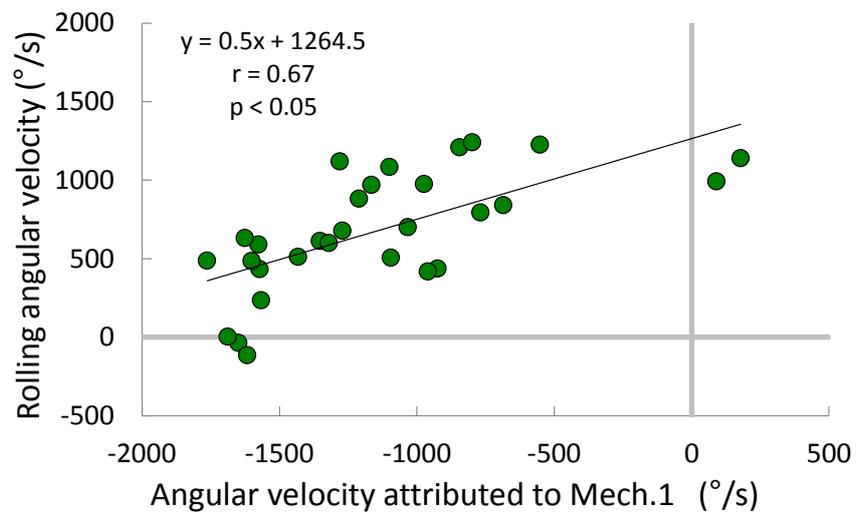
## 2.5 統計処理

ローリング角速度および各メカニズムに起因する角速度の平均値と標準偏差を算出した。各メカニズムに起因する角速度とローリング角速度との関連を調べるために、Pearson の積率相関係数を算出した。統計分析における有意水準は 5%未満とした。

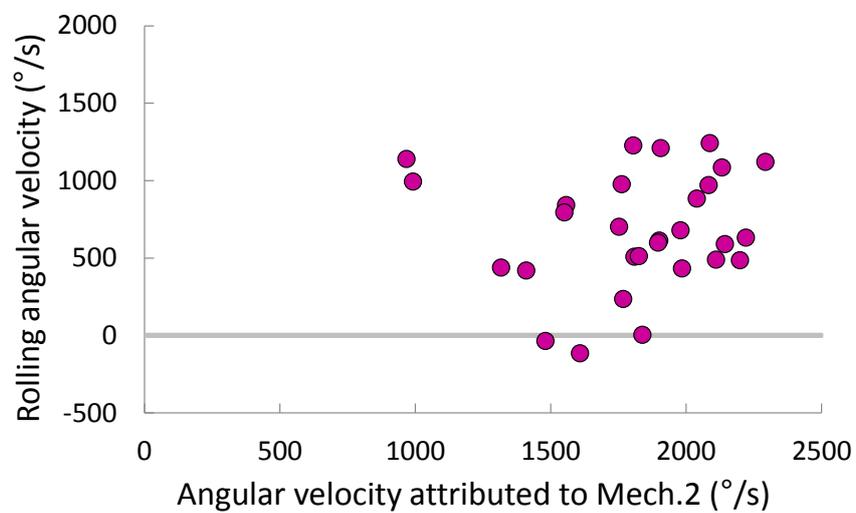
### 3. 結果

各打者が放った打球速度の平均値と標準偏差は  $40.2 \pm 2.8 \text{m/s}$  であり、その方向は  $-14.5^\circ$  (レフト側)  $\sim 8.9^\circ$  (ライト側) であった。インパクト直前のバットのヘッドスピードの平均値と標準偏差は  $36.2 \pm 1.7 \text{m/s}$  であり、インパクト時のバットの水平角は  $8.9 \pm 4.6^\circ$  ( $18.1^\circ \sim -1.2^\circ$ ) であった。インパクト直前のローリング角速度の平均値と標準偏差は  $677.9 \pm 375.9^\circ/\text{s}$  で、最も速いローリング角速度を記録した打者の値は  $1242.0^\circ/\text{s}$ 、最も遅いローリング角速度を記録した打者の値は  $-115.1^\circ/\text{s}$  (バックスピン) であった。個人内におけるローリング角速度の標準偏差は  $57.3^\circ/\text{s} \sim 402.0^\circ/\text{s}$  であった。インパクト直前までに累積された各メカニズムの貢献による角速度は、メカニズム 1 に起因する成分が  $-1143.5 \pm 487.6^\circ/\text{s}$  であり、メカニズム 2 に起因する成分が  $1807.9 \pm 339.1^\circ/\text{s}$  であった。

打者間においてローリング角速度とバットヘッドスピードとの間には有意な相関関係はみられなかった ( $r = 0.21$ )。また、個人内においてローリング角速度とバットヘッドスピードとの関連がみられる打者は 28 名中 2 名 (Sub.A :  $r = 0.75$ , Sub.B :  $r = -0.67$ ) のみであった。ローリング角速度とメカニズム 1 に起因する角速度との間に有意な相関関係がみられた (図 4-2 上段 :  $r = 0.67$ ,  $p < 0.05$ )。一方で、ローリング角速度とメカニズム 2 に起因する角速度との間には相関関係がみられなかった (図 4-2 下段 :  $r = 0.09$ )。



メカニズム1



メカニズム2

図 4-2 ローリング角速度と各メカニズムに起因する角速度との関係. 上段がメカニズム 1 との関係, 下段がメカニズム 2 との関係を示している.

#### 4. 考察

本研究の目的は、ローリングの決定要因である 2 つのメカニズムとローリング角速度との関連を横断的に調べ、ローリング角速度に個人差が生じる力学的要因を明らかにすることであった。その結果、メカニズム 1 に起因する角速度とローリング角速度との間に有意な相関関係がみられ、一方でメカニズム 2 に起因する角速度とローリング角速度との間には相関関係がみられなかった (図 4-2)。これらより、インパクト直前のローリング角速度の個人差は、メカニズム 1 に起因する角速度の個人差、すなわち打者が直接バット長軸まわりに作用させるモーメントによって生じる角速度の個人差によって生じていることが明らかとなった。

##### 4-1. ローリング角速度とバットの運動との関連

バットのローリング角速度とバットヘッドスピードとの間には有意な相関関係はみられなかった ( $r=0.21$ )。これは、ローリングが速い打者ほど、バットヘッドスピードが小さいといったトレードオフの関係やローリングが速い打者ほど、バットヘッドスピードが大きいという相乗効果のような関係がないことを示す結果である。先行研究 (城所ら 2011) においても、同様の結果が得られており、ローリング角速度の大きさはバットのヘッドスピードには影響を及ぼさないものと考えられる。また、個人内でのローリング角速度とバットヘッドスピードの関連をみると、2 名の打者にのみ関連がみられた。2 名の打者のヘッドスピードの標準偏差は 1.0m/s (Sub.A) と 1.8m/s (Sub.B) であり、変動係数 (平均値に対する標準偏差の割合) をみると 5%程度であった。また、Sub.B に関しては、ローリング角速度の標準偏差が最も大きく (402.7%/s)、個人間の標準偏差よりも大きかった。これらは個人内においてローリングが変動しようとも、バットヘッドスピードの変動は小さく、ローリングのバットヘッドスピードへの影響は小さいものであることを示している。Sub.B のローリング角速度の標準偏差が大きかった原因としては、自転の角速度のばらつき (448.9%/s) が、

他の打者と比較して大きかったことが考えられる。バットの自転はメカニズム 1 を規定する因子であるため、Sub.B は試技間でバット長軸まわりに作用させるモーメントが変化していたことを示唆するものである。

本研究ではセンター方向へ飛翔した打球を分析対象とした。打者間のバットの水平角のばらつきは約  $19^\circ$ であった ( $18.1^\circ$  (レフト側)~ $-1.2^\circ$  (ライト側))。インパクト直前のスイング角速度の平均値 ( $2425.5 \pm 98.1^\circ/\text{s}$ ) をもとに考えると、 $19^\circ$ の角度変化に有する時間はおよそ 8ms である。この時間は非常に短く、インパクトの 8ms 前からインパクト直前までのローリング角速度の変化の平均値は  $117^\circ/\text{s}$  であった。これは個人間におけるローリング角速度の標準偏差よりも小さいものであり、 $19^\circ$ というバット水平角間にバットがスイングされることによるローリング角速度の変化よりも、ローリング角速度の個人差の方が大きいことを示している。

#### 4.2 ローリング角速度の個人差の要因

ローリング角速度とメカニズム 1 に起因する角速度との間に認められた有意な相関関係は、メカニズム 1 に起因するバックスピン方向の角速度（ローリング抑制作用）が小さい打者ほど、トップスピン方向のローリング角速度が大きいこと、およびローリング角速度のばらつきの 45% (決定係数 :  $R^2 = 0.45$ ) をメカニズム 1 に起因する角速度のばらつきによって説明できることを示すものである。阿江ら (2013) によると、引手 (右打者の左手) がバックスピン方向のモーメント (ローリング抑制作用) を、押手 (右打者の右手) がトップスピン方向のモーメント (ローリング生成作用) をそれぞれ作用させていたことが報告されている。この報告に基づくと、メカニズム 1 に起因する角速度がバックスピン方向の角速度を有したのは、押手によるローリング生成作用を引手によるローリング抑制作用が上回ったためであると推察される。したがって、引手によるローリング抑制作用が小さく、押手によるローリング生成作用が大きい打者ほど、トップスピン方向のローリング角速度が大

きかったものと考えられる。一方で、ローリング角速度とメカニズム 2 に起因する角速度との間に相関関係はみられなかった ( $r=0.09$ )。これは、メカニズム 2 に起因するローリング生成作用の個人差とローリング角速度の個人差の間に直接の関連がなく、ローリング角速度の個人間のばらつきがメカニズム 2 に起因する角速度のばらつきのみからでは説明できないことが示されたのである。メカニズム 2 に起因する角速度は、スイング角速度（バットの短軸まわりの回転速度）とバットの鉛直角の角度変化である。これらスイング角速度やスイング開始からインパクトまでの鉛直角の角度変化の変動係数（平均値に対する標準偏差の割合）に着目すると、スイング角速度では 4 % であり、鉛直角の角度変化では 17 % であった。これらの変動係数はローリング角速度の変動係数（55 %）と比較すると小さい。そのため、メカニズム 2 のみでは、ローリング角速度のばらつきを説明することができなかったと考えられる。

力学的に捉えると、ローリング角速度は、2つのメカニズムに起因する角速度の和であるが、メカニズム 1 に起因する角速度によってローリング角速度のばらつきの 45% を説明することができるという統計分析結果は、メカニズム 2 に起因する角速度のばらつきによって残り 55% を説明できると解釈すべきではないことに言及しておく必要がある。これは、ローリング角速度のばらつきを説明する統計学的要因が、①各メカニズムに起因する角速度のばらつき、②両メカニズムが相互に影響を及ぼすことによるばらつき、③残差誤差によって構成されているためである。メカニズム 1 に起因する角速度を説明変数とした単回帰式（ばらつき全体の 45% を説明）に、メカニズム 2 に起因する角速度を独立変数として加え重回帰式にすることによってローリング角速度のばらつき全体の 93% を説明することができた ( $y = 0.99x_1 + 1.05x_2 + 99.70$ ,  $y$ : ローリング角速度,  $x_1$ : メカニズム 1 に起因する角速度,  $x_2$ : メカニズム 2 に起因する角速度)。これは、それ単独ではローリング角速度との相関関係が認められないメカニズム 2 が、メカニズム 1 の影響を排除するためにすべての打者でメカニズム 1 が一定であるとした場合にローリング角速度のばらつき全体の 48%

説明できることを示すものである。これらの結果は、メカニズム 2 に起因する角速度のばらつきによって説明できるローリング角速度のばらつきは限定的であり、メカニズム 1 に起因する角速度がローリング角速度の個人差を説明する上で重要な因子であることを示すものである。

#### 4.3 ローリングが速い打者の特徴

ローリングを速くするためには、打者がバットに作用させるローリング抑制作用を小さくすることが重要であることが示された。ローリング抑制作用をどのように小さくするかは、スイングを通した各メカニズムに起因する角速度の変化について観察する必要がある。そこで、インパクト直前のローリングの速さが異なる打者群についてスイングを観察し、その違いを示すことによって、ローリングを速くするためのスイングについて推察する。インパクト直前のローリング角速度が  $1000^{\circ}/s$  以上のローリングを記録した打者 (High 群 :  $n = 6$ ) と  $500^{\circ}/s$  未満の打者 (Low 群 :  $n = 9$ ) の各メカニズムに起因する角速度の時系列データに着目する (図 4-3)。メカニズム 2 に起因する角速度は、両群ともにインパクトのおおよそ 100ms 前からインパクト直前まで断続的に増加していた (インパクト直前の平均値 ; High 群 :  $1865.6 \pm 472.2^{\circ}/s$ , Low 群 :  $1755.4 \pm 327.0^{\circ}/s$ )。一方で、メカニズム 1 に起因する角速度も、両群ともにインパクトのおおよそ 100ms 前からローリング抑制方向に角速度が増加していた。その変化パターンについてみると、Low 群のみにおいてローリング抑制方向への急激な角速度の増加がみられた (インパクト直前の平均値 ; High 群 :  $-732.9 \pm 512.6^{\circ}/s$ , Low 群 :  $-1483.6 \pm 313.6^{\circ}/s$ )。この急激な増加はインパクトの約 50ms 前に開始されていた。これは、ローリングの遅い打者は、バックスピン方向へ加えていたモーメントをインパクトの 50ms 前からインパクトまでの間に急激に増大させていたことを示すものである。したがって、ローリング角速度を高めるためには、インパクトの 50ms 前からインパクトまでに作用するバックスピン方向のモーメント増大させないようにスイング

を行う必要があると考えられる。

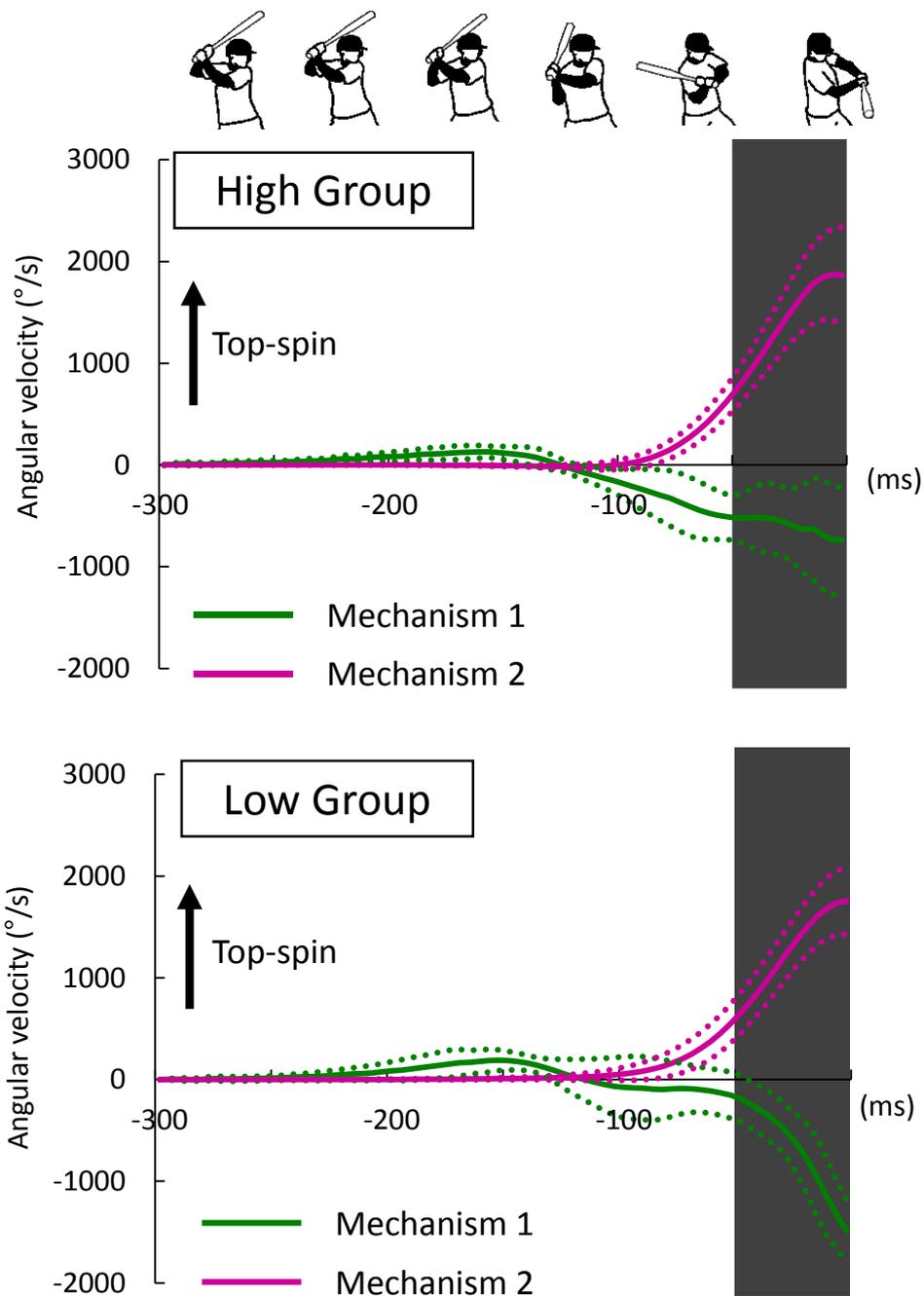


図 4-3 ローリング角速度が大きかったグループ (High Group : 上段) とローリング角速度が小さかったグループ (Low Group : 下段) それぞれにおける各メカニズムに起因する角速度の経時変化.

バックスピン方向のモーメントを増大させないためには、押手によるローリング生成作用を増大させ、引手によるローリング抑制作用を減少させる必要がある。インパクトの 50ms 前には、バットヘッドはほぼキャッチャー方向を向いている。この瞬間からボールインパクトまでのスイングにおいて、ブレーキ成分を小さくするための上肢の運動を検討する。まず、ローリング生成効果を高め得る押手の運動に着目する。川村ら (2008) の報告によると、押手の手関節はインパクトの 50ms 前からインパクトまでに橈屈位  $40^\circ$  から  $0^\circ$  (バット長軸と前腕長軸が  $90^\circ$  となる時の橈屈角 =  $0^\circ$ ) へと近づく。その際に、回内位にあった前腕が中間位に向けて回外することによって、バット長軸と肘関節の屈伸軸が平行に近づくと考えられる。この肢位に近づくにつれてバットのローリング角速度は肘関節の伸展角速度の影響を強く受け、その肢位に達した際には肘関節伸展角速度とローリング角速度はほぼ一致することになる (図 4-4 左)。したがって、肘関節の伸展運動はバット長軸まわりにトップスピン方向のモーメントを加える原動力の一つになると考えられる。実際に、打撃中の押手の肘関節はインパクトの 50ms 前から伸展方向の角速度を有していることに加え、伸展方向の関節トルクが発揮していることが報告されている (阿江ら 2014)。これらのデータを総合すると、押手の手関節と前腕の動きによって、バット長軸と肘関節屈伸軸を平行にさせ、肘関節を加速的に伸展させることによってローリング生成効果を高め、メカニズム 1 に起因するローリング抑制作用を減少させることができると推察される。一方、引手ではインパクトに向けて手関節が尺屈する (川村ら 2008) ことによって、バット長軸と前腕長軸が平行に近づく。インパクトの 50ms 前では、引手の前腕は回内方向の関節トルクを発揮していること (阿江ら 2014) が報告されている。手関節が尺屈位にあるため、この回内方向の関節トルクは、長軸まわりにはバックスピン方向へバットを回転させる働きと短軸まわりにはバットヘッドを下げるようにバットを回転させる働きを有することになる (図 4-4 右)。したがって、引手前腕の回内方向への関節トルクを減少させることにより、バット長軸まわりのバックスピン方向の成分が小さくなり、その結果としてローリング抑制作用も

低下させ得るものと考えられる。また、回内方向の関節トルクはバットヘッドを下げるように回転させる働きを有することから、バットヘッドを下げないようにスイングすることがメカニズム 1 に起因するローリング抑制作用の減少につながるものと推察される。

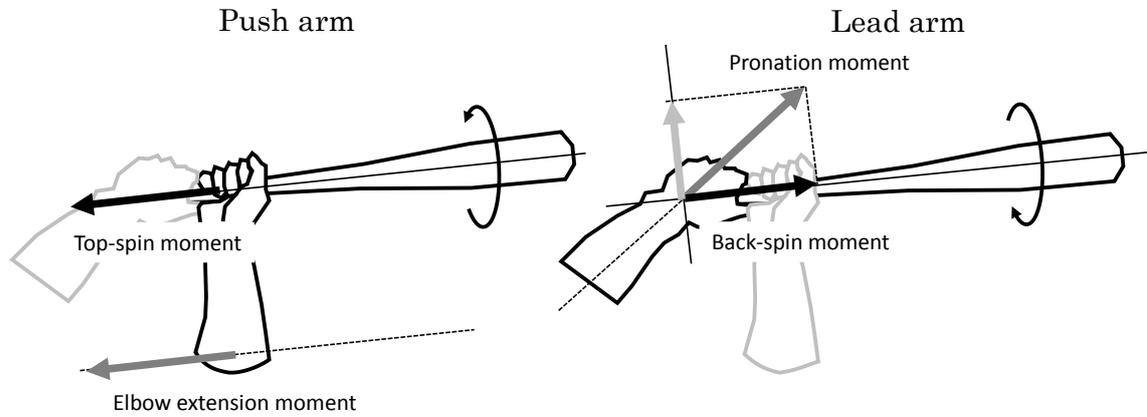


図 4-4 左右上肢における関節トルクとバット長軸まわりに作用するモーメントとの関係。左が押手（右打者の右手）、右が引手（右打者の左手）の関節トルクをそれぞれ示している。

High 群と Low 群におけるバットヘッドを下げる角速度（章動の角速度）に着目すると、両群ともにインパクトのおよそ 50ms 前で最大値（章動の最大値の平均値；High 群：1107.3 ± 232.2°/s, Low 群：930.8 ± 178.8°/s）を示し、インパクトに向けてその角速度は小さくなっていた。インパクト直前における章動の角速度の値は、High 群が-262.7 ± 246.9°/s, Low 群が-106.8 ± 243.5°/s であった。それぞれの局面において、統計的な有意差はみられないものの、Low 群と比較して High 群の章動の角速度の最大値は大きく、インパクト直前の値は小さいという傾向がみられた。これらは、両群ともにインパクトに向けてバットヘッドが下がる方向への回転（章動の角速度）を減速させていたこと、とりわけ High 群の方がより急激に減速させていたことを示すものである。実際に、章動の角速度の減速の大きさを対応のない t 検定を用いて比較すると、High 群の方が Low 群よりも大きく減速させていることが示された（図 4-5；High 群：1370.1 ± 299.7°/s, Low 群：1037.6 ± 267.2°/s,  $p < 0.05$ ）。

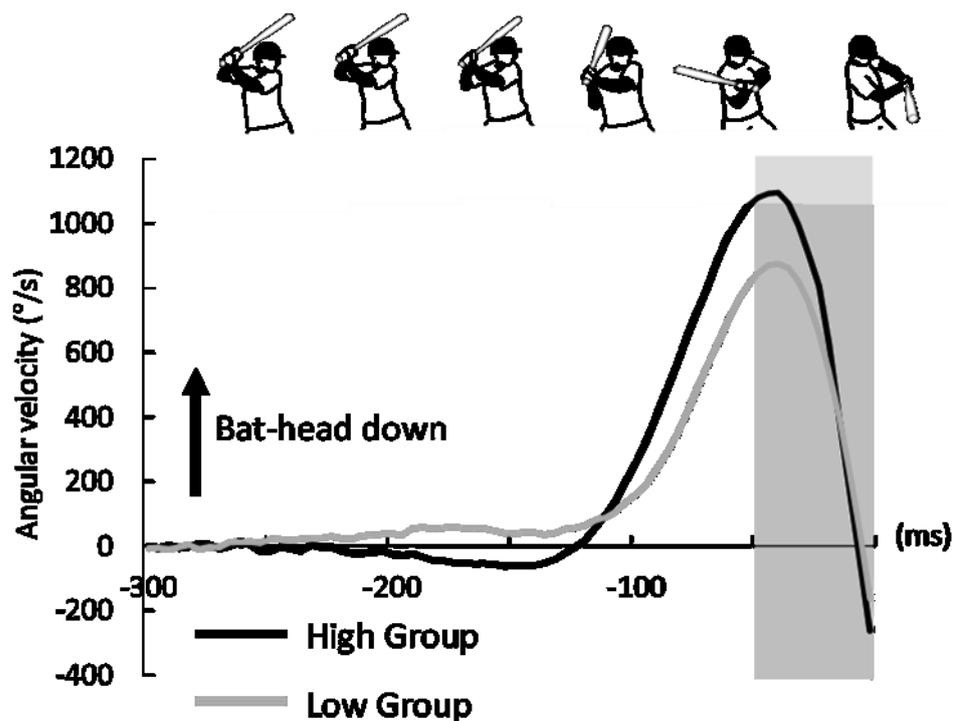


図 4-5 ローリング角速度が大きかったグループ (High Group) とローリング角速度が小さかったグループ (Low Group) それぞれにおける章動の角速度の経時変化.

この減速は、バットヘッドを上げる方向へのモーメントがバットに作用していたこと、すなわち、メカニズム 1 に起因するローリング抑制作用が減少していたことを意味すると考えられる。尚、章動の角速度はメカニズム 2 に起因する角速度の規定因子であるため、その増減はメカニズム 2 の貢献も変化させる (式 4-3)。しかしながら、メカニズム 2 に起因する角速度を低下させる要因は、章動の角速度の減速ではなく、章動の角速度の方向が負の値 (バットヘッドを上げる方向) になることであるため、章動の角速度が減速しても、その値が正であれば、メカニズム 2 に起因する角速度は増加し続ける。実際に、両群ともに章動の角速度が正の値であるインパクトの 4.2ms 前までは、メカニズム 2 に起因する角速度は増加し続けていた。それ以降、章動の角速度は負の値に転じたが、それによるメカニズム 2 に起因する角速度の低下は両群ともにわずかであった (High 群 :  $-59.2 \pm 55.9/s$ , Low 群 :  $-27.4 \pm 64.7/s$ )。つまり、章動の角速度が正の値を維持する限り、章動の角速度の減少をも

たらずモーメントはメカニズム 1 に起因するローリング抑制作用の減少というローリング生成効果に加え、メカニズム 2 に起因するローリング生成効果をもたらすのである。

スイングを通して、章動の角速度の減速を大きくする方法は 2 つ考えられる。一つは、章動の角速度の最大値を高めるようにスイングをする方法あり、もう一方はインパクト前にバットヘッドが大きく上がるように（章動の角速度の値が負となるように）スイングする方法である。前述したように、章動の角速度が負の値となるとメカニズム 2 に起因する角速度を減少させてしまう。さらに章動の角速度の最大値が小さく、インパクト時にその値が極端に負であると、メカニズム 2 に起因する角速度自体が小さくなってしまい、ローリング角速度を大きくするうえでは逆効果となってしまう。しかしながら、章動の角速度の最大値を高めておけば、メカニズム 2 に起因するローリング生成作用も大きくなるため、章動の角速度が負の値となる（バットヘッドが上がる）ことによるメカニズム 2 に起因する角速度の減少が相対的に小さくなると考えられる。すなわち、バットヘッドが大きく上がるようなスイングにおいても、メカニズム 2 に起因する角速度の獲得や章動の角速度の減速を大きくするために、予め章動の角速度の最大値を高めておくことが重要であると考えられる。したがって、インパクト直前で速いローリングを獲得するためには、インパクトの 50ms 前までに予めバットの章動の角速度を高めておき、そこから急激に章動の角速度を減速させるべく回外方向の関節トルクを發揮するか、あるいはバットヘッドを下げる働きを有する引手の回内方向の関節トルクを抑制することが重要であると考えられる。実際に High 群と Low 群の打者のバットヘッドの軌道を見ると、High 群の方が Low 群と比較して、バットヘッドが急激に下がっていた（図 4-6）。これは、インパクトの 50ms 前まではバットヘッドの章動の角速度を高めておくこと（つまり、バットヘッドを急激に下げるようにスイングすること）の重要性を示唆するものと考えられる。

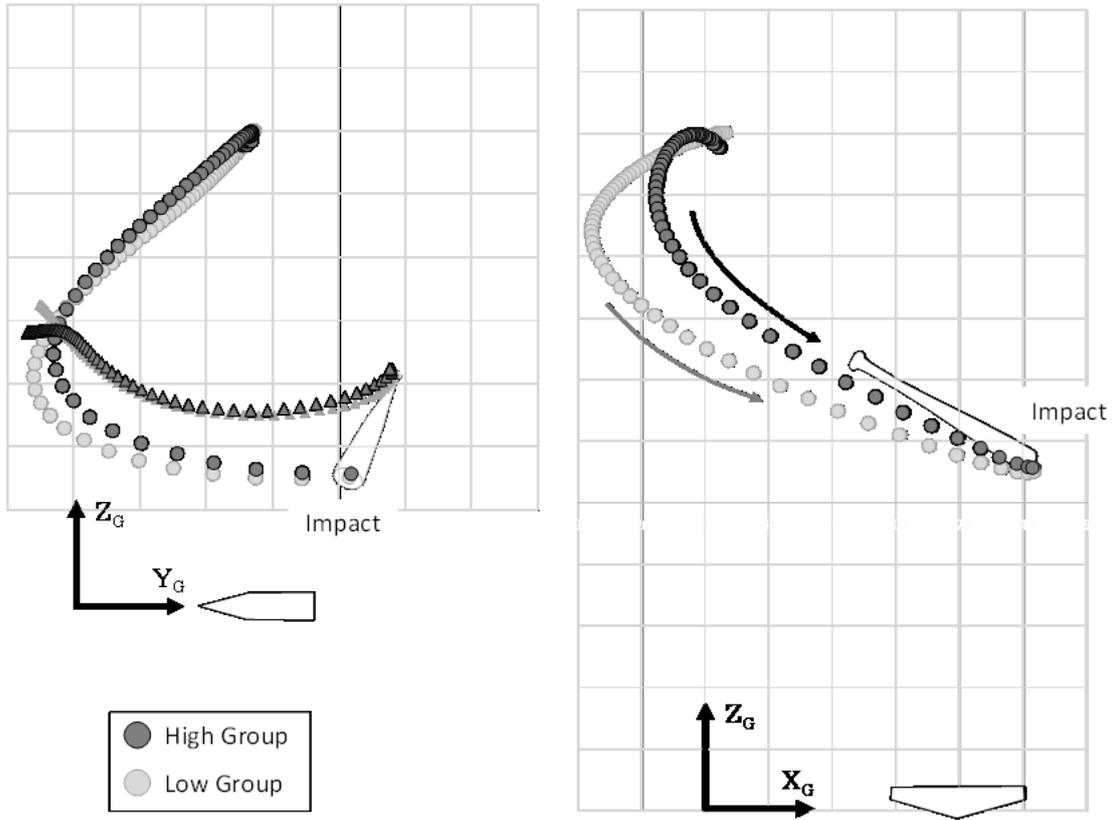


図 4-6 ローリング角速度が大きい打者とローリング角速度が小さい打者それぞれのバットヘッドの軌道.

## 5. まとめ

本研究の目的は、ローリングの決定要因である 2 つのメカニズムとローリング角速度との関連を個人間で横断的に調べ、ローリング角速度に個人差が生じる力学的要因を明らかにすることであった。ローリング角速度の個人差は、打者がバット長軸まわりに作用させるモーメントの大小によって生じ、ローリング抑制成分が小さい打者ほど速いローリングを獲得していた。速いローリングを獲得するためには、インパクトの 50ms 前まではバットヘッドを急激に倒すように章動の角速度を高めておき、そこからインパクトまでの間に急激に章動の角速度を減速させるべく関節トルク（とりわけ、引手の前腕回外トルク）を発揮することが重要であることが示唆された。

## 第5章 ローリングを高めるためのスイング

### 1. はじめに

インパクト時に大きなローリング角速度を獲得することによって、打者のパフォーマンスは向上し得る。しかしながら、ローリング角速度を大きくするためのスイングについてはこれまでの先行研究において実証されていない。Sawicki et al. (2003) は、ローリング角速度を高めると打球の飛距離が大きくなるものの、その速さを高める動作は、不自然な打撃動作であり、ヘッド速度を低下させる可能性があり、打撃全体として見た場合に逆効果であると指摘している。これは、インパクト直前に前腕の回旋運動の組み合わせである「リストターン」や「手首をこねる」といった動作を行うことがローリングの速度を高める運動として想定されたものであると推察される。しかしながら、バットのローリングは「リストターン」や「手首をこねる」というような打者の動作によって生じていないこと（第2章・第3章）が明らかとなっている。また、ローリング角速度の個人差は、打者がバット長軸まわりに作用させるモーメントの個人差によって生じており（第4章）、このバット長軸まわりのバックスピン方向のモーメントをいかに小さくするかがローリング角速度を高める上では重要である。打者によるバット長軸まわりのバックスピン方向のモーメントを小さくする方法として、第4章ではバットヘッドを急激に下げるようにスイングすることを提案した。これは、観察結果から得られた推察であり、実際にバットヘッドを急激に倒すようなスイングを行うことによってローリングの回転速度が高まるかは定かではない。

そこで本研究では、前章の考察で示唆された「ヘッドを立てた状態からバットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示による即時効果として、ローリングの回転速度が大きくなるのかを実践した。この教示によりローリングを高めることができれば、Sawicki et al. (2003) が懸念したリストターンによるバットのヘッドスピードの減少を生じさせずにバットをスイングすることができると考えられる。

## 2.方法

### 2.1 対象

野球経験者 10 名 ( $24.6 \pm 3.3$  歳,  $1.71 \pm 0.05$ m,  $67.2 \pm 5.2$ kg,  $10.0 \pm 1.2$ 年) を対象に実験を行った。このうち右打ちは 5 名であり, 左打ちは 5 名であった。実験の参加者には, 実験内容を十分に説明し, 実験参加の同意を得た。

### 2.2 実験試技

対象者には 2 条件のティー打撃をそれぞれ 5 試技ずつ行わせた。ティー台に設置された硬式ボールを木製バット (Global Elite, 1CJWH11684, ミズノ社製, 84cm, 900g) を用いて, 各条件に共通してセンター方向へ全力で打撃するように指示をした。なお, ティー台は各対象者がセンター方向へ打撃できる高さ・位置を対象者に任意で設置させ, 条件間および試技間で固定した。対象者には, ①通常のバットを用いた普段通りのスイング, ②通常のバットを用いて「ヘッドを立てて構え, ヘッドを急激に倒すようにスイングしてください」という教示を与えたスイングをそれぞれ行わせた。

### 2.3 データ収集・処理

それぞれのスイングにおけるバットの運動は, 3 次元的な運動が計測可能なセンサ (1GJMC00100, セイコーエプソン社製) を用いて 1000Hz で計測した。また, 専用の取り付け用アタッチメントを用いてバットのグリップエンドにセンサを装着した。計測されたデータは Bluetooth を用いた無線通信によってスマートフォン内の専用分析アプリケーション (Swing Tracer, Mizuno 社製) に取り込まれた。Swing Tracer は 3 軸の加速度計, 3 軸の角速度計および 3 軸の広レンジ加速度計を搭載しており, スイング中に得られたそれぞれのパラメータをアプリ内で計算することによって, スイング開始からインパクト時のバットの運動を提示するシステムである (清水ら 2015)。アプリによって提示されるデー

タは、スイング開始からインパクトまでのバットの軌道、バットヘッドスピード（最大値、インパクト直前）、バット重心の加速度、スイング時間（バットヘッドとグリップエンドの速度の合計が 5m/s を越えた瞬間からインパクトまでの時間）、ローリング角速度、スイング角度（バットヘッドの速度ベクトルと水平面のなす角度）、バットの鉛直角度（バット長軸と水平面のなす角度）、スイングの回転半径の 9 つである。アプリ内であらかじめバットの長さを登録することによって、バットヘッドの運動を算出することができる。各条件、各試技においてアプリによって提示されたバットヘッドスピードおよびローリング角速度をそれぞれ記録した。また、バットの章動の角速度はバットの鉛直角度を時間微分することによって算出した。

## 2.4 データ分析

各条件において 5 試技のうち、インパクト直前のヘッドスピードが最も速い試技と最も遅い試技を除いた 3 試技の平均値を被験者の代表値とした。インパクト時の各パラメータを比較するために、対応のある t 検定を行った。なお有意水準は 5%未満とした。また、バットの軌道についてはスイング開始時刻が条件間および試技間についてそれぞれ異なるものの、スイング時間はすべての試技において 100ms 以上であったため、インパクトの 100ms 前からインパクトまでを分析区間とした。

### 3.結果

インパクト直前におけるそれぞれの条件のバットヘッドスピードは、条件 1 が  $108.2 \pm 3.3 \text{ km/h}$ 、条件 2 が  $109.1 \pm 5.8 \text{ km/h}$  であった。条件 1 と条件 2 の間には有意な差はみられなかった ( $p = 0.46$ )。バットのローリング角速度は、条件 1 が  $772.4 \pm 279.3^\circ/\text{s}$ 、条件 2 が  $925.5 \pm 350.9^\circ/\text{s}$  であった。条件 2 は条件 1 よりも有意に大きな値であった ( $p < 0.05$  : 図 5-1)。

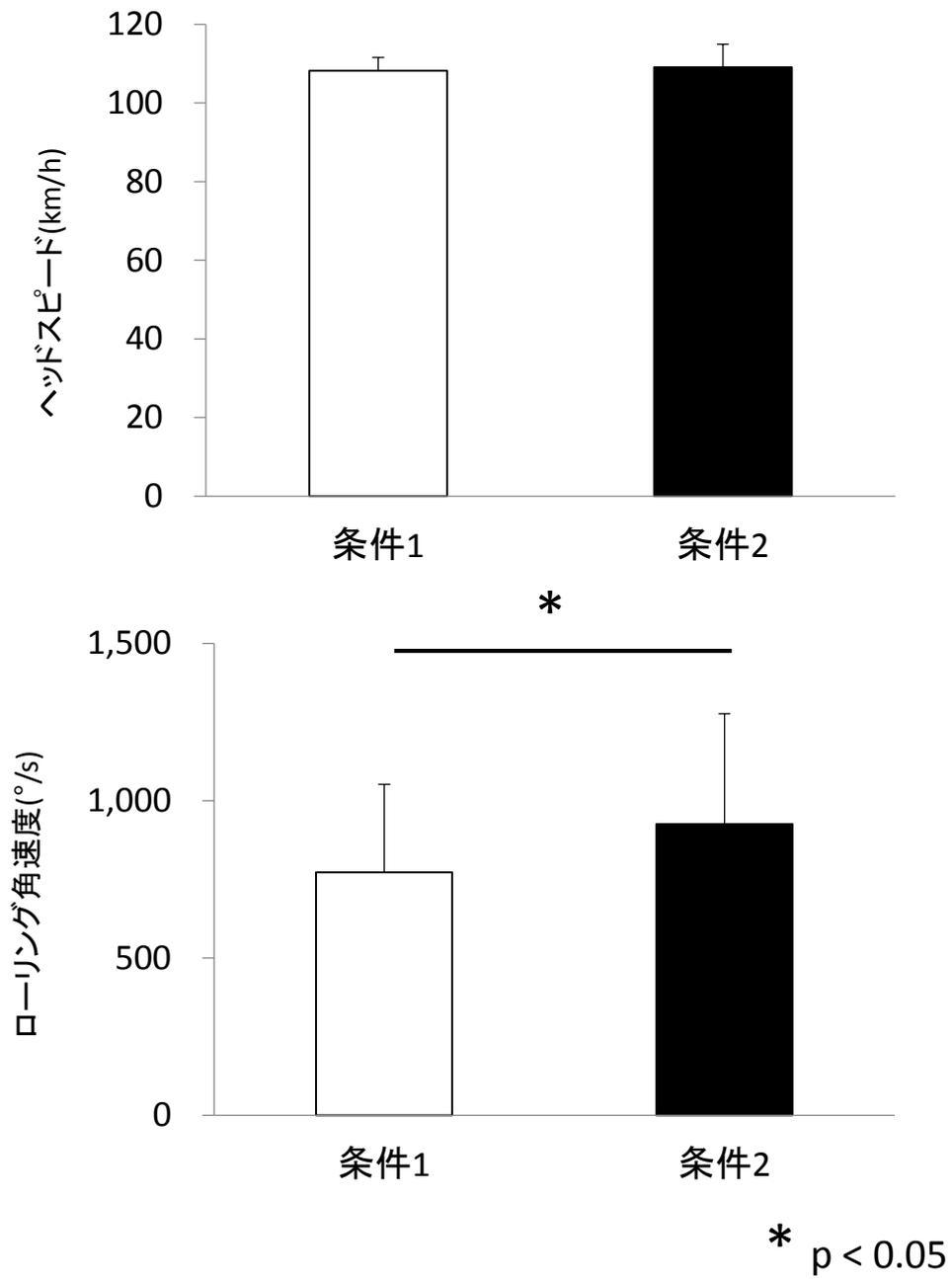


図 5-1 各条件におけるバットのヘッドスピード（上段）およびローリング角速度（下段）の平均値。条件1：通常のスイング，条件2：教示を与えたスイング。

#### 4.考察

本研究の目的は、「バットヘッドを立てた状態から急激にヘッドを倒すようにスイングする」という教示を与えることによって、ローリングの回転速度が大きくなるのかを実践することであった。その結果は、「バットヘッドを立てた状態から急激にヘッドを倒すようにスイングする（条件 2）」ことによってヘッドスピードを変化させることなく、ローリング角速度を大きくできることを示すものである。それぞれの打者についてみると、教示によってローリング角速度が大きくなった打者は 7 名であり、ローリング角速度が小さくなった打者は 3 名であった。最もローリング角速度が大きくなった打者は約  $390^{\circ}/s$  大きくなった（条件 1 :  $616.2^{\circ}/s$ , 条件 2 :  $1005.8^{\circ}/s$ ）。条件 1 で記録したローリング角速度に対する条件 2 で記録したローリング角速度の割合は  $121.8 \pm 28.8\%$  であった。これは、教示によって通常のスイングに対して約 120%程度のローリング角速度を獲得できることを示している。

ローリング角速度の個人差を生じさせる要因は、打者がバット長軸まわりに直接作用させるモーメントの大きさである（第 4 章）。打者がバット長軸まわりに作用させるモーメントは、トップスピン方向のローリングに対してバックスピン方向へ作用するため、ローリング抑制効果を有する（第 3 章）。このローリング抑制効果をいかに小さくするかが、ローリングを高める上では重要である。打撃中にローリング抑制効果をもたらすのは、引手（右打者の左手）がバット長軸まわりに作用させるバックスピン方向のモーメントであること（阿江ら 2013）が報告されている。すなわち、引手によるバット長軸まわりのモーメントを小さくすることによって、ローリング抑制効果を小さくできると考えられる。バットと引手前腕の相対的な位置をみると、インパクトに向けて手関節が尺屈することによってバット長軸と前腕長軸は平行へと近づく。この際に引手前腕では回内方向の関節トルクが発揮されており（阿江ら 2014）、この回内方向の関節トルクはバットヘッドを下げる働きに加えて、バットを長軸まわりにバックスピン方向へ回転させる働きも有すると考えられる。すなわち、引手前腕の回内方向の関節トルクを小さくするようにスイングする、もしくは回外トル

クを発揮するようにスイングすることによって間接的にバット長軸まわりに作用するバックスピン方向のモーメントが小さくなると考えられている(第4章)。ローリングが速い打者と遅い打者の打撃中の章動の角速度(バットヘッドを倒す角速度)を比較した場合、ローリングが速い打者の方がインパクト 50ms 前の値が大きいものの、インパクト時には両群ともにほぼ同じ値であることが示されている(第4章)。これはローリングが速い打者の方が、バットヘッドを倒す角速度を大きく減速させていることを示すものであり、バットヘッドを上げるようなモーメントが作用していたことを推察できるものである。バットヘッドを立てた状態からバットヘッドを急激に倒すようにスイングすることで、予め章動の角速度を高めておき、その角速度を減速させるために引手前腕の回内方向の関節トルクを小さくする、もしくは回外方向の関節トルクを発揮する必要があるため、バット長軸まわりのバックスピン方向のモーメントを小さくすることができると前章では推察している。すなわち、教示によってローリングが変化した打者と変化しなかった打者について、バットの鉛直角や章動の角速度に着目することによって、ローリング角速度を大きくするためのスイングの特徴を実際にバットに作用するモーメントを計測せずとも、なぜローリング角速度が大きくなったのかを推測することが可能であると考えられる。そこで、それぞれの打者のスイングの特徴を示し、ローリング角速度の変化について論ずる。

通常のスイングでは、平均的なローリング角速度を有し、教示によってローリング角速度が最も大きくなった打者(sub.A)とほぼ変化しなかった打者(sub.B)、最も小さくなった打者(Sub.C)と、通常のスイングにおいても大きなローリング角速度を獲得したが教示によってローリング角速度の大きさが変化しなかった打者(sub.D)のバットの鉛直角および章動の角速度についてみてみることにする。分析区間はインパクトの100ms前からインパクトまでの間とした。

#### A. 教示によって通常のスイングからローリングが大きくなった打者

Sub.A は、通常のスイングにおけるローリング角速度は、 $616.2^\circ/\text{s}$  であり、教示を受けたスイングにおけるローリング角速度は、 $1005.8^\circ/\text{s}$  であった。また、それぞれの条件におけるバットのヘッドスピードは、条件 1 が  $101.4\text{km/h}$  で、条件 2 が  $100.8\text{km/h}$  であった。この 2 つの条件間では、ヘッドスピードはほぼ同じであった。Sub.A は教示を受けることによって、ローリング角速度が  $400^\circ/\text{s}$  程度大きくなった。すなわち、教示によって引手のモーメントを小さくできていたことを示している。実際に、インパクトの  $100\text{ms}$  前におけるバットの鉛直角を見てみると (図 5-2 左)、条件 1 では  $37.3^\circ$  であるのに対し、条件 2 では  $50.0^\circ$  であった。またインパクト直前における鉛直角は、条件 1 が  $-22.3^\circ$  であり、条件 2 が  $-33.3^\circ$  であった。これは、同じ時間内に条件 2 の方がより大きく角度変化していることを示しており、バットヘッドを急激に倒すスイングができていたことを表している。さらに、章動の角速度をみると (図 5-2 右)、その最大値は条件 2 ( $1288.7^\circ/\text{s}$ ) の方が大きかった (条件 1:  $963.7^\circ/\text{s}$ )。また、インパクト直前における章動の角速度はそれぞれ条件 1 が  $50.0^\circ/\text{s}$  で、条件 2 が  $14.7^\circ/\text{s}$  であるため、バットヘッドを下げる方向の角速度の減速は、条件 2 の方が大きいことを示している。すなわち、第 4 章で提案したように条件 2 では、バットヘッドを上げるようなモーメントが大きく働き、ローリング抑制作用を有する前腕の回内方向の関節トルクを小さくすることができたものと考えられる。

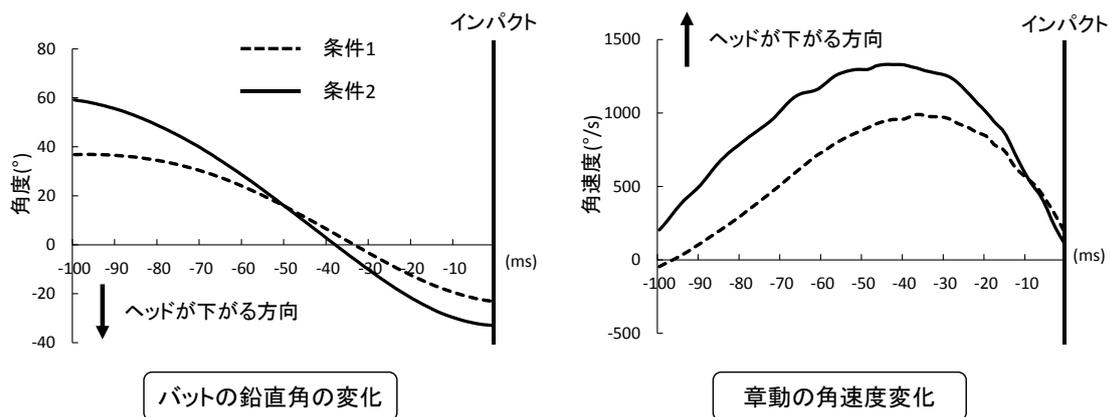


図 5-2 Sub. A のバットの鉛直角の変化と章動の角速度の変化それぞれの典型例. 教示を与えたスイングにおいて、章動の角速度の最大値が大きくなっている。

B. 教示を受けても通常のスイングとローリングの大きさが変化しなかった打者

Sub.B は、通常のスイングにおけるローリング角速度は、 $762.6^\circ/\text{s}$  であり、教示を受けたスイングにおけるローリング角速度は、 $843.4^\circ/\text{s}$  であった。また、それぞれの条件におけるバットのヘッドスピードは、条件 1 が  $109.2\text{km/h}$ 、条件 2 が  $109.0\text{km/h}$  であり、条件間でヘッドスピードも同じであった。Sub.B は教示を受けることによって、ローリング角速度が  $80^\circ/\text{s}$  程度大きくなったのみであった。Sub.B の 2 条件 5 試技ずつの標準偏差は、 $126^\circ/\text{s}$  であるため、条件間の  $80^\circ/\text{s}$  という平均値の差は、試技間のばらつきによるものであると考えられる。現に、通常のスイングと教示を与えたスイングでは、インパクトの  $100\text{ms}$  前やインパクト直前におけるバットの鉛直角には違いはみられなかった。これは、教示したように急激にバットヘッドを倒すことができていなかったことを示すものである。また、章動の角速度では最大値がほぼ同程度であり（条件 1： $882.3^\circ/\text{s}$ 、条件 2： $878.3^\circ/\text{s}$ ）、インパクト直前における値は条件 1 が  $-99.0^\circ/\text{s}$  であり、条件 2 が  $82.0^\circ/\text{s}$  であった（図 5-3）。

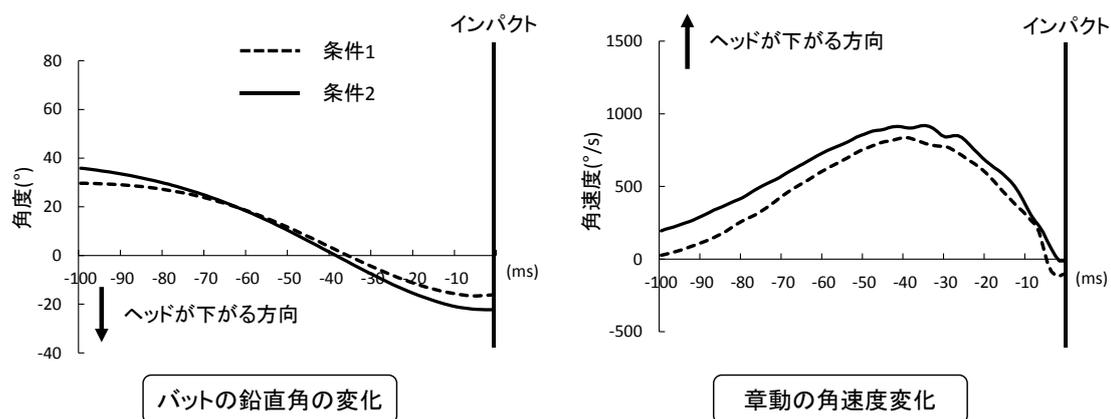


図 5-3 Sub. B のバットの鉛直角の変化と章動の角速度の変化それぞれの典型例. バットの鉛直角や章動の角速度において両条件間に Sub. A ほどの差がみられない.

これも、条件 1 と条件 2 における章動の角速度の減速が同程度であったことを示すものである。すなわち、Sub.B は教示された「バットヘッドを急激に倒す」ようなスイングができていなかったために、ローリング角速度の変化が限定的であったものと考えられる。また、教示を受けたスイングで最もローリング角速度が小さくなった Sub.C は約 135°/s ローリング角速度が小さくなっていた (条件 1 : 937°/s, 条件 2 : 797.6°/s)。Sub.C の 2 条件における 5 試技分のローリング角速度の標準偏差をみると、条件 1 が 183.6°/s, 条件 2 が 208.8°/s であった。Sub.C も Sub.B と同様に教示によってローリング角速度が変化したのではなく、試技間のばらつきによって平均値に違いがみられたと考えられる。一方で、通常のスイングにおいて大きなローリング角速度を獲得していたが、教示によってローリングの大きさが変化しなかった打者 (Sub.D) は、通常のスイングにおけるローリング角速度が 1212.0°/s であり、教示を与えたスイングでは 1220.2°/s であった。その大きさはほぼ同程度であった。これらの結果は、Sub.D は通常のスイングにおいて既に他の打者よりも引手のモーメントが小さいことを示唆する結果である。章動の角速度の最大値 (条件 1 : 695.7°/s, 条件 2 : 741.0°/s) やバットの鉛直角の変化量 (条件 1 : 41.3°, 条件 2 : 42.0°) をみても、通常のスイングと教示を与えたスイングでは変化はみられなかった。Sub.D の章動の角速度の最大値は Sub.A や Sub.B のものと比較すると小さい値であった。しかしながら、インパクト直

前の値も、Sub.A や Sub.B とは異なり、バットヘッドを起こす方向の角速度が大きかった (条件 1 :  $-116.7^\circ/\text{s}$ , 条件 2 :  $-248.3^\circ/\text{s}$ ). そのため、章動の角速度の最大値は小さいがバットヘッドを倒す方向の減速が大きく、大きなローリング角速度を獲得していたと考えられる. すなわち、Sub.D は通常のスイングにおいてバットヘッドを急激に倒していないものの、倒れてきたバットヘッドをインパクト直前に起こすための大きな角速度を有し、バットヘッドを起こしている. そのようにすることによって、ローリング抑制作用を有すると考えられる引手前腕の回内方向の関節トルクを小さくし、高速なローリング角速度を獲得していたと考えられる.

ローリング角速度を大きくする教示としての「バットヘッドを急激に倒す」という教示はローリング角速度を高めうることが示された. しかしながら、ヘッドを急激に倒すことを意識し、バットヘッドを倒し続けると、章動の角速度の減速が小さくなってしまいうために、引手のモーメントを小さくすることができず、ローリング角速度を大きくすることは望めないものと考えられる. また、通常のスイングにおいて大きなローリング角速度を獲得している打者は、すでに引手のモーメントが小さくローリング抑制作用が小さいため、メカニズム 2 に起因する角速度を大きくすることによって、ローリング角速度を大きくすることが重要であると考えられる. メカニズム 2 は章動の角速度や歳差運動の角速度に起因するため、これらの角速度を反映するバットのヘッドスピードを高めることによって、ローリング角速度がより大きくなることが考えられる.

## 5. まとめ

本研究の目的は、「ヘッドを立てた状態からバットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示した際に、即時効果としてローリングの回転速度が大きくなるのかを実践することであった。その結果、教示通りのスイングを行うことによって、バットのヘッドスピードが変化することなく、ローリング角速度が大きくなることが示された。

## 第6章 総括論議

野球の打撃では、バット長軸そのものの回転以外にバット長軸まわりの回転運動（ローリング）が生じており、インパクト時にローリングの回転速度がトップスピン方向に大きい打撃ほど、打球の運動エネルギーの大きな打球が放たれること（城所ら 2011）、打球の飛距離が伸びること（Sawicki et al. 2003）、同じ飛距離の打球でも低い弾道で打球が飛翔すること（志村ら 2012）が報告されている。これらの知見によりローリングの回転速度（ローリング角速度）を大きくすることは打者のパフォーマンスを高めることにつながると考えられる。本学位論文では、野球の打撃における①上肢の回旋運動、②ローリングの発生メカニズム、③ローリング角速度の個人差の要因、④ローリングを高めるスイングを調べることによって、実際の打撃中に打者がどのようにローリング角速度を高めるのかを検討することを目的とした。

指導現場において、バットのローリングは左右上肢の協調運動である「リストターン（引手前腕回外と押手前腕回内）」によって生み出されていると考えられていた。実際に打撃中の左右上肢の運動についてみると、引手側ではインパクト前に前腕が回外方向の角速度を有しており、また関節運動においても前腕は回外していた。一方で押手側においても、インパクト前に前腕は回外方向の角速度を有し、関節運動をみても回外運動をしていた。これらの結果は、引手側ではローリングを生み出し得る前腕の回外がみられたものの、押手側ではローリングを生み出し得る運動として考えられた前腕の回内ではなく、インパクト前には押手側の前腕も回外していた。これはリストターンがインパクト前に生じていないことを示しており、インパクト前のローリングはリストターンという左右上肢の協調運動によって生じていないことが明らかとなった（第2章）。

身体運動とバットの運動を観察することのみでは、バットのローリングのメカニズムを探ることは困難である。バットの回転運動を力学的にみると、2つのメカニズムによってバ

ット長軸まわりの回転は生み出されている。1つ目のメカニズムは、打者がバット長軸まわりに直接モーメントを加えることによってバット長軸まわりに角運動量を獲得する方法（メカニズム 1）であり、2つ目のメカニズムは、バット長軸まわりに直接モーメントを加えずともバットの角運動量ベクトルに対してバット長軸の向きが変化することによってバット長軸まわりに角運動量を獲得する方法（メカニズム 2）である。実際の打撃における各メカニズムの貢献をみると、インパクト直前では、メカニズム 1 に起因する角速度がバックスピン方向を示し、メカニズム 2 に起因する角速度がトップスピン方向を示していた。これらの結果は、バットのローリングはメカニズム 2、すなわちバットの角運動量ベクトルに対して、バット長軸が  $90^\circ$  以上を保つような角速度を有することによって生じていることを示している。さらに、打者が直接バット長軸まわりに作用させるモーメント（メカニズム 1）は、前述したようにバックスピン方向の角速度を生じさせ、ローリングに対しては負の貢献をしていた。これは第 2 章で示されたリストターンという動作によって、ローリングは生じないという知見をサポートするものであった（第 3 章）。第 2 章では、リストターンを構成する引手側の回外がみられ、これがローリングに貢献すると考えられた。しかしながら、阿江ら（2013）の報告によると、引手が作用させるモーメントはバット長軸まわりにはローリングを抑制する方向（バックスピン方向）に作用することが示されている。これは引手の運動がローリングに貢献しないことを示すものである。引手前腕の回外方向の角速度（ $396^\circ/\text{s}$ ）や回外角度変化量（ $20^\circ$ ）をみると、ローリング角速度（ $725^\circ/\text{s}$ ）やその角度変化量（ $70^\circ$ ）よりも小さく、高速でローリングするバットに対してはブレーキとなっていたと考えられる。実際に引手のモーメントが小さくなるように細工したバットを用いたスイングでは、通常のスイングよりもローリング角速度が大きくなっていた。これは、引手の運動がローリングに対してブレーキとなっていることを実証するものであり、「リストターン」によってローリングが生じないという第 2 章の結果、およびメカニズム 1 がトップスピン方向のローリングに対してブレーキとなるという第 3 章の結果を裏付けするものである。また、

この結果は引手の前腕が能動的に回外をしているのではなく、引手がブレーキとしてバットに加えたモーメントの反作用として、引手前腕を受動的に回外方向へ回転させていることを示すものである。これらをまとめると、身体運動でみられた引手前腕の回外運動は、バットのローリングに貢献する運動ではなく、バットのローリングによって生じてしまう運動であると言える。

ローリングが力学的にどのように生じるのかは、第 3 章において明らかとなった。ローリングの回転速度を大きくするための方策を明らかにするためには、まずはローリング角速度の個人差が生じる力学的な要因を探り、大きなローリング角速度を獲得している打者のスイングについて詳細に分析する必要がある。第 4 章では、ローリング角速度とローリング角速度を構成する 2 つのメカニズムに起因する角速度との関係について検討した。その結果、メカニズム 2 に起因する角速度とローリング角速度の間には関連がみられなかったものの、メカニズム 1 に起因する角速度とローリング角速度の間には関連がみられた。この結果は、ローリング角速度の個人差は、メカニズム 1 に起因する角速度の個人差によって生じていることを示している。メカニズム 1 に起因する角速度は、第 3 章で示されたようにバックスピン方向の角速度を示すため、ローリング抑制作用を有しており、このローリング抑制作用が小さい打者ほど大きなローリング角速度を獲得することが明らかとなった。前述したように、バットのローリングは引手のモーメントによってバットのローリングが抑制されている（阿江ら 2013）。引手前腕長軸とバット長軸との相対的な位置をみると、第 2 章で示されたように  $90^\circ$  以上となる。この際、引手前腕では回内方向の関節トルクが発揮されていること（阿江ら 2014）が報告されており、バット長軸と前腕長軸が  $90^\circ$  以上となった場合、引手前腕の回内方向の関節トルクは、バット長軸まわりにはバックスピン方向の成分を有する。すなわち、この回内方向の関節トルクを小さくする、もしくは回外方向の関節トルクを発揮できれば、ローリング抑制作用が小さくなり、ローリング角速度が大きくなると考えられる。回内方向の関節トルクは、バットヘッドを下げる成分を持つ。すなわち、

インパクトに向けてバットヘッドを上げる方向へモーメントを加えるようにスイングすることによって、回内方向の関節トルクを減少させることができると考えられる。大きなローリング角速度を獲得する打者のスイングの特徴をみると、スイング開始からバットヘッドを急激に倒し、大きな章動の角速度を獲得していた。大きな章動の角速度をインパクトに向けて減速させるためには、バットヘッドを上げる方向のモーメントを作用させなければならない。バットヘッドを上げる方向のモーメントを大きくするためには、引手前腕の回内方向の関節トルクを小さくする、あるいは回外方向の関節トルクを発揮する必要がある。すなわち、バットヘッドを急激に倒し、予め大きな章動の角速度を予め獲得し、それをインパクトに向けて減速させることによって、ローリング抑制作用を有する回内方向の関節トルクが小さくなり、ローリング角速度が大きいスイングをしていることが示唆された（第4章）。

この「バットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示を実践することによって、ローリング角速度が大きくなるかは疑問であった。実際に、通常のスイングと教示を与えたスイングを行わせたところ、教示を与えたスイングではインパクト直前のローリング角速度が増加していた。打者10名のうち、7名のローリング角速度が増加し、そのうち4名が300°/s以上ローリング角速度が増加していた。最もローリング角速度が増加した打者のスイングをみると、教示通りにバットヘッドを急激に倒すスイングをしていた。一方で、変化がみられなかった打者は、通常のスイングと教示を与えたスイングにおいて、同じスイング軌道を示していた。これらより、教示どおりのスイングを行っていた選手は、通常のスイングと比較して、ヘッドスピードを変えずにローリング角速度が増加することが示された（第5章：図6-1）。

ローリングを速くするためのスイングとそのスイング軌道について考える。ローリングを速くするためのスイングでは、章動の角速度（バットヘッドを倒す方向）を大きく減速させることが重要であることが第4章で示された。章動の角速度の減速を大きくするための方法は、インパクトの50ms前付近までにバットヘッドを急激に倒すことによって章動の

角速度の最大値を高めておくこと、およびインパクト前にバットヘッドを起こすようにスイングすることである。インパクト前にバットヘッドを起こすようにスイングすることは、バットヘッドがグリップエンドに対して上方向へ上がるようなスイングとなるため、バットヘッドの軌道がアップースイングとなりうる。つまり、ローリングを速くするためのスイングは、インパクト前にバットヘッドを起こすようにすることによって、バットヘッドの軌道がアップースイングになると考えられる。先行研究では、アップースイングでインパクトすることによって、打球の飛距離が大きくなることが示されている（城所ら 2011）。すなわち、ローリングを速くするためのスイングは、高速なローリングの影響による打球飛距離の増加に加え、インパクト直前のバットヘッドの軌道がアップースイングになることによる打球飛距離の増加も期待できるため、シミュレーション法によって算出されたわずかな打球飛距離の増加よりも大きな打球飛距離の増加を生み出すものと推察される。

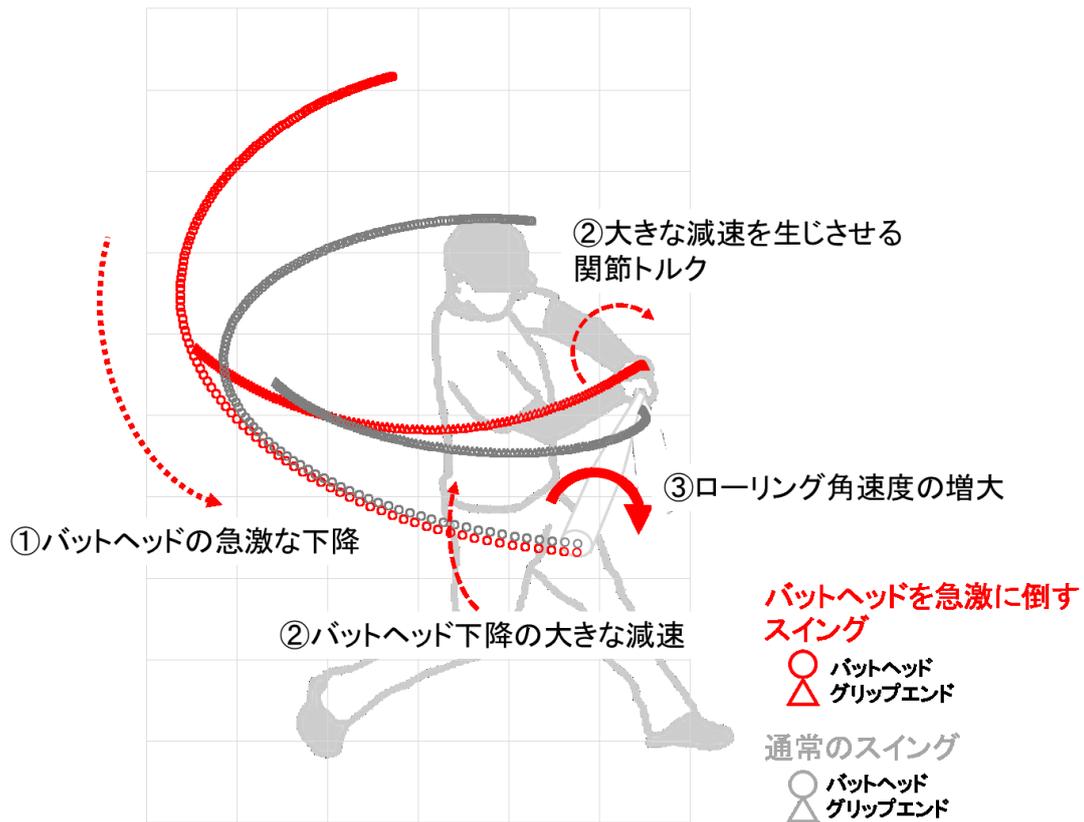


図 6-1 ローリングを高めるためのスイング. ①バットヘッドを立てて構え, バットヘッドを急激に倒すようにスイングすることによって, 章動の角速度(バットヘッドを倒す角速度)が増大する. ②インパクトに向けて章動の角速度を減速させるために引手前腕長軸まわりの回内トルク(バットヘッドを下げる作用)を小さくする, もしくは回外トルク(バットヘッドを上げる作用)を発揮する. ③ローリング抑制作用が小さくなり, ローリング角速度が増大する

第 2 章から第 4 章の対象は、大学野球選手やプロ野球選手といった競技レベルの高い選手であった。一方で、第 5 章のローリングを高めるためのスイングを実践した対象者は、野球経験者であったため、第 2 章から第 4 章までの対象者と比較すると、競技レベルは低かった。実際に、第 2 章から第 4 章における対象者と第 5 章における対象者のヘッドスピードの平均値をみると、それぞれ 115.5km/h (大学野球選手)、127.9km/h (プロ野球選手) と 108.2km/h (野球経験者) であった。バットのヘッドスピードが異なるということは、バットに作用する力やモーメントの大きさが異なることを示している。すなわち、ローリング抑制作用の大きさが競技レベルによって異なる可能性がある。そのため、高速なバットヘッドスピードを獲得する競技レベルの高い選手に対して「バットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示を与えた場合に、実際にローリング角速度が高まるかは、今後検証する必要があるであろう。また、第 5 章ではティー打撃を用いて試技を行った。実際の打撃では、打者は投げられたボールを短い時間でボールが到達する位置を判断し、バットをコントロールし打撃する必要がある。そのため、ティー打撃と比較すると実際の打撃は難易度が高く、教示通りのスイングを行えるかどうかはわからない。実際の打撃についても教示によってローリング角速度が大きくなるかも今後の検討課題である。また、本研究では、すべてセンター方向をめがけての打撃、もしくはセンター方向へ飛翔した打球を分析対象としている。野球の打撃では、前述したように投球されたボールのコースに対して四肢を巧みに動かすことでバットをコントロールし、状況に応じて打球をレフト方向やライト方向に打ち分けている。打球方向はインパクト時のバットの水平角（バット長軸を地面に投影した際の打席間を結ぶラインとバット長軸との角度）のみでは決定されないものの（城所ら 2015）、ライト方向からレフト方向へ打球の飛翔方向が変化するにつれて、インパクトエリアがレフト方向に移動する傾向にあることが報告されている（城所ら 2013）。また、様々な投球コースに対するバットの姿勢は、四肢や体幹の動きによって調節されている（田子ら 2006a, 田子ら 2006b）。これらを踏まえると、打球方向によってローリングの発生メカニズムや個人

差の要因が変化する可能性がある。しかしながら、打点の高さを変化させた打撃において、バット長軸まわりに作用するモーメントは阿江ら（2013）の結果を見る限り、その大きさや変化の傾向ほとんど変わらない。また、ローリングが発生するメカニズムにおいても、スイング開始から 2 つのメカニズムは相反しながらトップスピン方向とバックスピン方向へそれぞれ増加するという傾向がすべての打者で示されているので、内外角といったコースや打ち分けにおいて、その関係が逆転するという事態は生じないと考えられる。すなわち、打球コースや打ち分けによってローリングの発生メカニズムや個人差の要因は本研究で明らかにしたセンター方向の結果と同様のものになると考えられる。

## 第7章 結論

本学位論文では、野球の打撃におけるバットのローリングについて研究を行った。その結果、バットのローリングを生じさせ得ると考えられたリストターンという動作は、インパクト前には生じておらず、リストターンはインパクト前のローリングの原動力ではないことが示された。バットのローリングは、リストターンのような打者がバットに加えたバット長軸まわりのモーメントではなく、バットの角運動量ベクトルに対してバット長軸の向きが  $90^\circ$  以上を保つような角速度を有することによって生じており、打者による長軸まわりのモーメントはブレーキ（ローリング抑制作用）として作用していることが明らかとなった。また、大きなローリングの回転速度を獲得する打者は、バット長軸まわりに作用させるローリング抑制作用のモーメントが小さいことが示された。ローリング抑制作用のモーメントを小さくするスイングの教示として、「バットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示が示唆された。実際にこの教示を行いスイングすることによって、通常のスイングよりも大きなローリング角速度を獲得できることが明らかとなった。すなわち、ローリングを高めるためには従来考えられていたリストターンではなく、「バットヘッドを急激に倒すようにスイングする」という教示が有効であるということが示された。

## 参考文献

- Abdel-Aziz YI, Karara HM (1971) : Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry .  
Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry : 1-18
- 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 : 431-452
- Andrews JG (1995) Euler's and Lagrange's equations for linked rigid-body models of three-dimensional human motion : Three-dimensional analysis of human movement.  
Allard P et al. Human Kinetics, America
- Breen (1967) : What makes a good hitter ? Journal of Health, Physical Education, Recreation 38 : 36-39
- Cross R (2009) : Mechanics of swinging a bat. American Journal of Physics 77 (1) : 36-43
- Cross R, Nathan AM (2006) : Scattering of a baseball by a bat. American Journal of Physics 74 (10) : 896-904
- Haug EJ (1992) : Intermediate dynamics. Prentice-Hall, America
- Hay JG, Reid JG (1982) : ANATOMY, MECHANICS, and HUMAN MOTION. Prentice Hall, America
- Hibbeler RC (2013) : Engineering mechanics: Statics and Dynamics thirteenth edition.  
Pearson Prentice Hall, America
- 平野裕一 (1984) : バットによる打の動作. Japanese Journal of Sports Science 3 (3) : 199-208

- 平野裕一 (1992) : 打つ科学. 大修館書店, 東京
- Inkster B, Murphy A, Bower R, Watsford M (2011) : Difference in the kinematics of the baseball swing between hitters of varying skill. *Medicine & science in sports & exercise* 43 (6) : 1050-1054
- 川村卓, 島田一志, 阿江通良 (2001) : 熟練野球選手の打撃動作における両手の動きについて. *大学体育研究* 23 : 17-28
- 川村卓, 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 : 423-438
- 城所収二, 若原卓, 矢内利政 (2011) : 野球のバッティングにおける打球飛距離と打球の運動エネルギーに影響を及ぼすスイング特性. *バイオメカニクス研究* 15 (3) : 78-86
- 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 No.13-34* : 119
- 城所収二, 矢内利政 (2015) : 野球における流し打ちを可能にするもう一つのインパクトメカニズム. *体育学研究* 60 : 103-115
- King K, Hough J, McGinnis R, Perkins NC (2012) : A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. *Sports Engineering* 15 : 41-52
- Koike S, Iida H, Kawamura T, Fujii N, 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
- 小池関也, 川村卓, 阿江通良 (2009) : 野球打撃動作におけるヘッドスピード生成に対する上肢関節の順動力学的貢献. *Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM 論文集*
- 宮西智久(2006) 打撃動作と体幹・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

森下義隆, 那須大毅, 神事努, 平野裕一 (2012) : 広角に長打を放つためのバットの動き.

バイオメカニクス研究 16 (1) : 52-59

Nathan AM (2000) : Dynamics of the baseball-bat collision. American Journal of Physics

68 (11) : 979-990

Nathan AM (2008) : The effect of spin on the flight of a baseball. American Journal of

Physics 76 (2) : 119-124

小田伸午, 森谷敏夫, 田口貞善, 松本珠希, 見正富美子 (1991) : 地面反力から見た野球の

ティーバッティング技術. 体育学研究 36 : 255-262

Putnam CA (1993) : Sequential motions of body segments in striking and throwing skills:

descriptions and explanations. Journal of Biomechanics 26 (1) : 125-135

Sawicki GS, Hubbard M, Stronge WJ (2003) : How to hit home runs: Optimum baseball

bat swing parameters for maximum range trajectories. American Journal of Physics

71 (11) : 1152-1162

Shaffer B, Jobe FW, Pink M, Perry J (1993) : Baseball batting: an electromyographic

study. Clinical orthopaedics and related research 292 : 285-293

清水雄一, 鳴尾丈司, 柴田翔平, 矢内利政 (2015) : 慣性センサを用いた野球スイングにお

けるバット挙動の計測. スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集

No.15-21 : A-21

志村芽衣, 宮澤隆, 矢内利政 (2012) : スイング角度およびローリング角速度が打球特性に

及ぼす影響: 野球のインパクトシミュレーション. バイオメカニクス研究 16 (3) : 138-

147

Szymanski DJ, McIntyre JS, Szymanski JM, Bradford TJ, Schade RL, Madsen N,

Pascoe DD (2007) : Effect of torso rotational strength on angular hip, angular

- shoulder, and linear bat velocities of high school baseball players. *Journal of strength and conditioning research* 21 (4) : 1117-1125
- 田子孝仁, 阿江通良, 藤井範久, 小池関也, 高橋佳三, 川村卓 (2006) : 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) : 4-10
- 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
- Watts RG, Bahill AT (2000) : Keep your eye on the ball: Curve balls, knuckleballs, and fallacies of baseball. W.H.Freeman, NewYork
- Welch CM, Banks SA, Cook FF, Draovitch P(1995) Hitting a baseball: : A biomechanical description. *Journal of orthopaedic& sports physical therapy*22(5) : 193-201
- Yanai T (2007) : A mechanical cause of body rotation about vertical axis in baseball batting. *Annual meeting of American Society of Biomechanics Proceeding.*
- 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

## 謝辞

本博士論文は、矢内利政教授の指導のもと執筆いたしました。矢内先生には大学院修士課程から博士課程までの6年間という期間の間に論文執筆やデータ収集などを通して研究とはどういうものか、研究に対してどういう姿勢で取り組むべきかなど、研究者としてのあるべき姿を学ばせていただきました。また、研究活動以外にも様々な貴重な経験をさせていただきました。プロ野球選手や社会人野球選手、MLB選手のデータ収集、プロ野球春季キャンプへの参加など、大学院に入る前には想像もしていなかった体験を多々させていただきました。研究に対する熱心な指導や貴重な経験をさせていただいたこと、心より感謝いたします。

本学位論文の副査を快く引き受けてくださった先生方にも心より感謝申し上げます。川上泰雄教授にはバイオメカニクス研究チームとして合同ミーティングや学会などでたくさんアドバイスをさせていただきました。また「野球好き」として私を推挽してくださりました。彼末一之教授にはユニークな観点から様々なご指摘およびアドバイスをいただきました。国立スポーツ科学センターの平野裕一先生には野球の専門家としての論文のアドバイスに加えて野球選手の見方についてもアドバイスいただきました。副査の先生方のご指摘やアドバイスにより、本学位論文は大変有意義なものになりました。

近田彰治先生には、データ処理から分析、論文執筆あらゆる面でアドバイスしていただき、大変お世話になりました。近田先生との数多くのディスカッションのおかげで研究を進めることができました。宮本直和先生や若原卓先生には研究についてのアドバイスに加えて、叱咤激励をたくさんしていただきました。ありがとうございました。

同じ野球グループとして数多くのデータ収集や実験をともに行ってきた先輩方にも大変お世話になりました。森下義隆さん、城所収二さんには実験やグループミーティングを通して、研究活動を多々サポートしていただきました。また野球の研究を行うにあたり、研究室の垣根を越えて永見智行さんや樋口貴俊さんにも多大なるサポートをしていただきました。

野球グループとして、先輩方と研究をできたことは非常に嬉しく、また普段の会話や冗談など何気ない会話が私の研究活動をより楽しいものにしてくれました。ありがとうございました。

バイオメカニクス研究チームの佐藤隆彦さん、茂木康嘉さん、丸山祐丞さん、杜唐慧子さん、江間諒一くん、塩田義裕くんには、ミーティングや研究室での会話において、野球経験者とは異なる観点から様々なアドバイスをしていただきました。また、研究以外にも公私ともに楽しい時間を過ごすことができました。素晴らしい研究室のメンバーに囲まれて研究できたことは、とても幸せです。ありがとうございました。

私が研究や現場で活動できたのも、ゼミ・研究室の多くの先輩・同期・後輩、また研究室に限らず大学や大学院の先生・先輩・同期・後輩の力と助けがあってこそでした。早稲田大学での10年間に会った皆様に感謝の意を表します。

そして最後に、長きにわたる私の学生生活を快く支援してくれた父親と母親をはじめとする私の家族に心より感謝いたします。

2016年1月 谷中拓哉