

2023年度 3月修了 修士論文

野球の異なるポジションで用いられる投球様式が
投球時の肘関節内反トルクに与える影響
～中学生野球選手を対象として～

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

5020A035－8

佐々木 陽平

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第 1 章	緒言.....	1
第 2 章	方法.....	5
2.1	実験参加者.....	4
2.2	実験試技の設定.....	6
2.3	測定機器の設定.....	9
2.4	データ収集.....	10
2.5	統計処理.....	11
第 3 章	結果.....	12
3.1	肘関節最大内反トルク値.....	12
3.2	球速.....	13
第 4 章	考察.....	14
4.1	肘関節最大内反トルク値の信頼性と妥当性.....	14
4.2	仮説検定結果の考察.....	16
4.3	ポジションと肘関節障害リスクの関連.....	18
4.4	本研究の限界.....	19
第 5 章	結論.....	21
参考文献		22
謝辞		26

第1章 緒言

日本の中学生野球選手には肘関節障害が高率で発症している。平成28年9月～平成29年2月の期間に日本全国の中学生野球選手を対象とした調査（対象者数11,134名）が全日本野球協会らによって行われ、中学生野球選手の52.1%が1年以内に何らかの痛みを経験していたことが報告された（全日本野球協会ら, 2016）。痛みの28.3%が肘関節に発生しており、肩関節（17.8%）や膝（15.2%）、足首（10.7%）など他の身体部位を上回り、最も高い割合であった。

成長期野球選手に生じる肘関節障害の特徴の1つは、内側と外側に軟部組織もしくは骨組織の損傷が生じやすいことである（Atwater, 1979）。これら成長期野球選手に生じる肘関節障害はBrodgen et al. (1960)によって「Little leaguer's elbow」と呼称され、肘関節への反復性ストレスによって引き起こされる慢性障害であることが現在も知られている。野球選手に生じる肘関節障害の力学的原因は、肘関節を外反させる力学的ストレス（外反ストレス）が反復されることにより、肘関節内側部の軟部組織が伸張され、外側部の骨組織が圧迫されることである（Barnes et al., 1978）。

先行研究で成長期野球選手の肘関節痛や肘関節障害の発症因子が挙げられている。9～12歳の投手を対象にした先行研究（Lyman et al., 2001）と14～20歳の投手を対象とした先行研究（Olsen et al., 2006）では、共通した肘関節障害発症因子として投球数と上肢疲労感が挙げられている。全てのポジションの7～11歳の野球選手を対象とした先行研究（Matsuura et al., 2013）では、年齢、投手と捕手のポジションを務めること、年間試合数が肘関節痛の発症因子として挙げられている。著者らは試合や練習における投手と捕手の投球数がその他のポジション（内野手や外野手）と比較して多いことが肘関節痛の発症要因となる可能性を考察している。これらの報告に基づくと、過度な投球が成長期野球選手に

おける肘関節障害発症の根本的な危険因子となり、これに陥りやすい投手と捕手を務める選手に肘障害が多発するものと考えられる。

日本では、野手にも肘関節障害が多いことが地域の小学生野球選手を対象とした野球検診（メディカルチェック）の結果として報告されている（加藤ら, 2011 高橋ら, 2020）。メディカルチェックは医療関係者によってスポーツ傷害の一次予防を目的として実施されるが、メディカルチェックによって何らかの痛みや身体の異常を示す陽性所見が明らかになることも多い（帖佐, 2015）。地域のさまざまなレベルの小学生野球選手 474 名を対象としたメディカルチェック（加藤ら, 2011）によると、肘関節の運動時痛、圧痛、ストレステストのいずれかで陽性を呈した者は 83 名（被検診者全体の 17.5%）で、その内訳は投手 14 名（投手全体の 13.9%）、捕手 7 名（捕手全体の 15.6%）、野手 62 名（野手全体の 18.9%）であった。全国大会に出場した小学生野球選手 678 名を対象としたメディカルチェック（高橋ら, 2020）によると、超音波エコーで肘関節に異常所見が認められた者は投手捕手兼任選手 24 名（投手捕手兼任選手全体の 80%）、投手 88 名（投手全体の 79%）、捕手 45 名（捕手全体の 75%）、野手 283 名（野手全体の 56%）であった。これらの報告からは、投手と野手どちらの発症率が高いかは明らかではないが、野手の肘関節障害も多く報告されているといえる。したがって、投手だけでなく野手に生じる肘関節障害要因について検討する意義は大きいと考えられる。

野手に生じる肘関節障害について検討するにあたり、成長期野球選手における肘関節障害の発症は肘関節への外反ストレスの回数だけでなく、頻度および 1 球あたりの大きさによる影響を考慮する必要があると考えられる。3 つの要素（回数、頻度、大きさ）を投手と野手で比較すると、投手の投球数が野手と比べて多くなることから外反ストレスの回数は投手が多くなると考えられる。頻度は投手と野手が同じチームに所属していると考えれば練習や試合の頻度は同じ

であるため、両者の間に差はないと考えられる。したがって、野手は投手と比較して肘関節への 1 球あたりの外反ストレスが大きくなり、野手の肘関節障害の発症に影響を与えると考えられる。

野球選手がボールを投げる投球様式は、ポジションや試合状況によって異なる。投手は走者の有無によってワインドアップからの投球とセットポジションからの投球を使い分ける。前者は後者と比較してストライド長が長く、体幹回旋角速度が大きいことが報告されている（蔭山ら, 2015）。内野手の用いる送球は投球動作時間を短縮するために、動作がコンパクトにまとまっている。具体的には、投手の投球と比べてストライド長が短く、肘関節の屈曲角度が大きく、体幹部の側屈・屈伸角度が小さいことが報告されている（宮西ら, 2015）。外野手の用いる送球は助走をつけた遠投動作となることが特徴で、投手と比べて体幹部の前傾・後傾角度が大きく、踏み出し足側膝関節の屈曲角度が小さいことが報告されている（梅野ら, 2011）。ポジション特有の投球様式が一定の特徴を有していることから、それぞれの投球動作によって選手の肘関節に作用する力学的ストレスの大きさも異なると考えられる。

投球動作は身体の運動連鎖を用いて遂行され、その過程で肘関節は受動的に外反される。この受動的に肘関節を外反させようとするトルク（外反ストレス）に抗って外反脱臼を防止し、その正常機能を維持するはたらきを担うのが、肘関節を構成する骨組織（上腕骨、尺骨、橈骨）と周囲の軟組織（靱帯、関節包、筋等）が発揮する肘関節内反トルクである（Feltner et al., 1986 Fleisig et al., 1995）。外反ストレスと肘関節組織が発揮する内反トルクは作用・反作用の関係となることから、本研究では肘関節内反トルクを肘関節への外反ストレスの大きさを評価する指標として用いることとした。本研究では、投球した際の肘関節内反トルクを算出し、投手の用いる投球様式と野手が用いる投球様式との間で肘関節内反トルクを比較することを目的とした。投球数が少ないにもかかわらず野手

にも肘関節障害が多数報告されていることを踏まえ、本研究では、野手が用いる投球様式の方が投手が用いる投球様式よりも肘関節内反トルクが大きい、という仮説を立てた。

第2章 方法

2.1 実験対象者

本研究の対象者は長野県の中学生硬式野球チームに所属している男子野球選手 30 名とした（表 1）。競技レベルは所属するリーグにおいて例年県大会へ出場する「地区トップレベル」のチームであった。検者はすべての対象者に対して、実験日における心身状態を口頭で確認し、野球のプレーに支障がないことを確認した。また、対象者およびその保護者、チーム指導者に対して本研究の目的や実験方法、期間、危害の可能性、個人情報の取り扱いについて説明し、実験参加への書面による同意を得た。本実験の実施にあたり、「早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会」による承認を得た（承認番号：2022-197）。

表 1. 参加者属性(平均±標準偏差)

人数(名)	30
年齢(歳)	13.6 ± 1.1
体重(kg)	53.5 ± 12.3
身長(cm)	163.1 ± 8.9
BMI(kg/m ²)	19.9 ± 3.2
野球歴(年)	5.4 ± 1.6
主なポジション(名)	投手:7
	捕手:3
	※重複回答なし 内野手:11
	外野手:9

2.2 実験試技の設定

本研究は対象者が所属するチームが通常練習を行う屋外のグラウンドの平らな場所において実施した。実験は7月～12月の期間で天候が晴れている日の10時～16時の間に実施した。対象者には通常練習を行うユニホームと公式戦で用いるスパイクを着用させた。データ収集のための測定機器を前腕へ装着するため、長袖のアンダーシャツを着用している場合はアンダーシャツを脱がせてユニホームのみを着用させた。非投球側上肢には対象者が通常練習や公式戦で使用するグローブを着用させた。また、実験試技は全て平地の屋外グラウンドで実施し、投手用のマウンドは使用しなかった。実験試技に入る前に、自由にジョギングやダイナミックストレッチング、ダッシュ、キャッチボールといった十分なウォーミングアップを行わせた。

実験試技は①～④の4条件を以下のように設定し、実験に入る前に対象者へ説明を実施した。実験試技は4種類の条件について5球ずつ、合計20球を捕球者に対して投球することであった。

実験条件①：ワインドアップ条件（図1）

対象者の軸足と捕球者の構える位置との距離は18.44mに設定した。捕球者として防具をつけない状態の選手をホームベースの背後に配置し、中腰の姿勢でグローブを胸部前方へ構えるように指示した。対象者へは「投手のポジションについていると想定してください。18.44m先に構えている捕球者に向かって全力に近いストレートを投球してください。」との口頭指示を与えた。口頭指示においては全力投球を指示することによって制球力の低下が懸念されたため、「全力に近い」という表現を用いた。また、投球に際して転倒や動作の中断など、公認野球規則（日本プロフェッショナル野球組織ら, 2022）に記された投手としての投球動作の規則に反した動作を含んだ試技は実験試技としてカウントせず、再度試技を指示した。

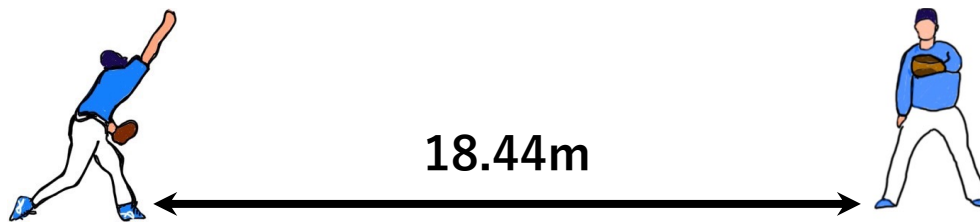


図 1. ワインドアップ条件・セットポジション条件における実験距離の設定

実験条件②：セットポジション条件（図 1）

対象者と捕球者との距離、捕球者の設定はワインドアップ条件と同様とした。対象者への口頭指示は「投手のポジションについていると想定してください。ランナーが 1 塁にいます、できるだけ素早い動作で 18.44m 先に構えている捕球者に向かって全力に近いストレートを投球してください。」とした。ワインドアップ条件と同様、全力投球を指示することによって制球力の低下が懸念されたため、「全力に近い」という表現を用いることとした。また、投球に際して転倒や動作の中断など、公認野球規則（日本プロフェッショナル野球組織ら, 2022）に記された投手としての投球動作の規則に反した動作を含んだ試技は実験試技としてカウントせず、再度試技を指示した。

実験条件③：内野送球条件（図 2）

対象者のボールリリース位置から捕球者までの距離が 30m となるように実験を行うため、対象者が試技開始前に構える位置と捕球者との距離は 30m よりも長い距離（33～35m 程度）とした。検者は捕球者へ中腰の姿勢で構え、胸部の前方へグローブを構えるよう指示した。対象者への口頭指示は「遊撃手のポジションの守備についていると想定してください。斜めの位置から転がってくるゴロを捕球した後、30m 先の 1 塁の位置に構えている捕球者に向かって、公式戦で打者走者をアウトにするように送球してください。」とした。「ゴロ」とは対象

者が試技開始前に構える位置から 5m 離れた距離から検者が下手投げで転がして緩めの打球を模したグラウンダーのゴロとした。内野送球条件では、右投げの対象者に対しては対象者が捕球者と向かい合った角度を 0 度とした時に、対象者から見て右斜め 45 度前方から（左投げの対象者に対しては対象者から見て左斜め 45 度前方から）、ゴロを転がした。試技の途中で転倒や落球など、スムーズな動作が遂行できなかった場合には試技数にはカウントせず再度試技を指示した。

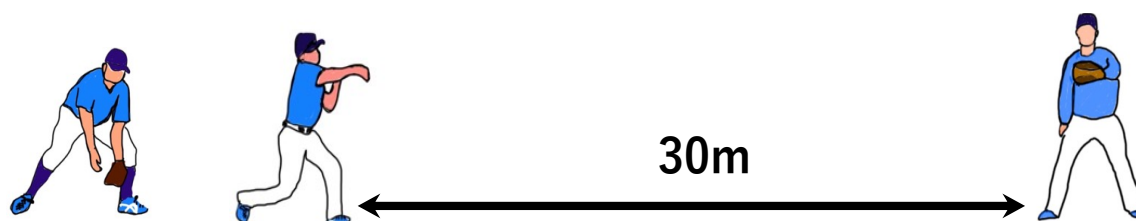


図 2. 内野送球条件における実験距離の設定

実験条件④：外野送球条件（図 3）

対象者のボールリリース位置から捕球者までの距離が 60m となるよう実験を行うため、対象者が試技開始前に構える位置と捕球者との距離は 60m よりも長い距離（63～65m 程度）であった。検者は捕球者へ中腰の姿勢で構え、胸部の前方へグローブを構えるよう指示した。対象者への口頭指示は「外野手のポジションの守備についていると想定してください。正面から転がってくるゴロを捕球した後、60m 先の本塁の位置に構えている捕球者に向かって、公式戦で本塁へ走り込む走者をアウトにするように送球してください。」とした。「ゴロ」とは 5m 前方から検者が下手投げで転がした緩い打球を模したグラウンダーのゴロとした。捕球前後でステップを踏むことを考慮し、指定した目標までの距離よりも離れた場所から試技を開始、ボールリリースの位置から目標までの距離が

60m となるように実験を行った。試技の途中で転倒や落球など、スムーズな動作が遂行できなかった場合には試技数にはカウントせず再度試技を指示した。

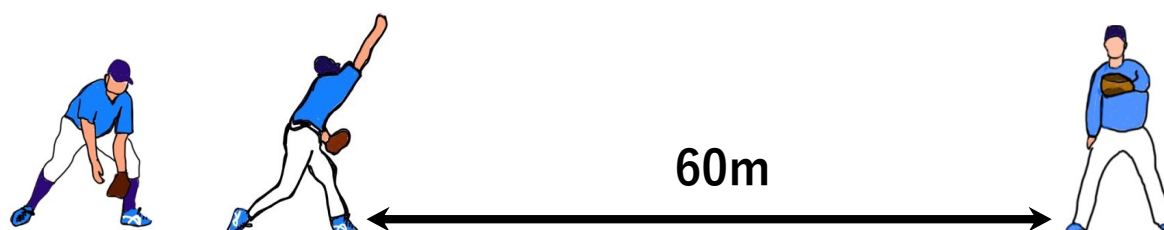


図 3. 外野送球条件における実験距離の設定

2.3 測定機器の設定

本研究では、IMU(Internal Measurement Unit: 慣性計測装置)センサ (Xsens dot[®]、Xsens 社製)を参加者の投球側上肢(前腕遠位部)に固定することによって、前腕セグメントの方位・加速度・角速度を計測した。サンプリング周波数は120Hzとした。IMU センサの固定には両面テープ(ニチバン社製)、キネシオテープ(キネシオ社製)、およびテーピング用アンダーラップ(Mueller Sports Medicine 社製)を用いた。固定場所は尺骨茎状突起と橈骨外側顆を結んだ中点と IMU センサの上端の中心が一致し、IMU センサの長軸と手関節中間位における第三中手骨の長軸が一致する位置とした。固定方法は投球動作を妨げず、かつ、発汗や摩擦力によるセンサーのズレを最小限にするため、皮膚にキネシオテープを貼付した上に IMU センサを両面テープで貼付、その上からアンダーラップを8周させて固定した(図4)。また、ドップラー型スピードガン(Yupiteru BSG-1Basic)を参加者の後方約5mの位置に設置してボールの球速を計測した。

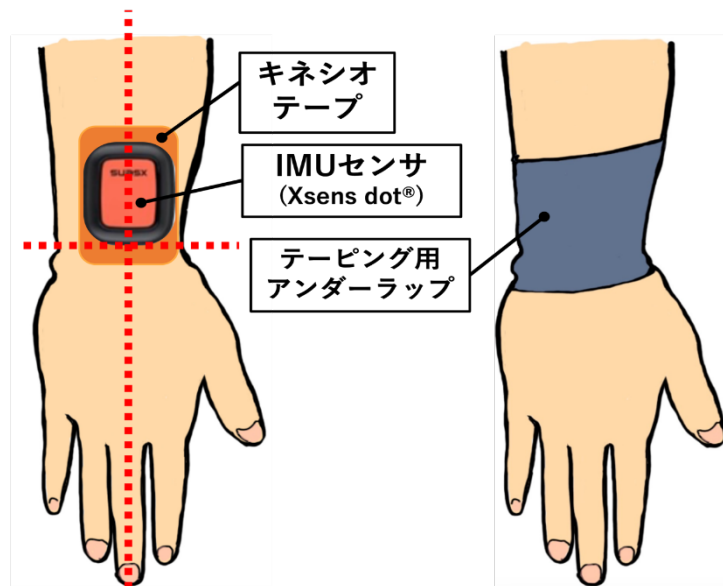


図 4. IMU センサの固定場所および固定方法(右腕)

2.4 データ収集

本研究では、IMU センサから得られた方位・加速度・角速度データを、当研究室において独自に開発して肘関節内反トルクを算出する専用アプリを用いて読み込み、逆動力学分析を行うことによって肘関節内反トルクおよび肘関節内反トルクの時系列変化を示すトルクカーブを出力した。トルクカーブの最大値を肘関節最大内反トルクとして後述する統計分析に用いた。肘関節内反トルクの算出には、投球腕の肘関節以遠のボール+手部+前腕部を併せて1つの剛体セグメントであると仮定する「1セグメントモデル」(山岸ら, 2018)を採用した。1セグメントモデルを用いて算出された肘関節内反トルクは、モーションキャプチャシステムを用いて計測された真値と高い相関関係(山岸ら, 2018; 大住, 2019)および高い精度(大住, 2019)が報告されている。

投球による IMU センサの振動や汗によるセンサ貼付部のズレなどの影響によって計測値にノイズが混入する可能性が考えられた。そのため、本研究では当

該データに対して妥当性を担保するために肘関節最大内反トルクの外れ値とトルクカーブの特徴が先行研究から大きく逸脱した試技を除外した。まず、同条件から得られた 5 試技の肘関節最大内反トルク値に対して、四分位範囲を用いた方法 (Mosteller F et al., 2006) によって外れ値を検出した。四分位範囲の 1.5 倍の範囲にあり外れ値として該当した投動作によって得られた計測値は除外することとした。さらに、残された試技から出力されたトルクカーブを観察し、「肩関節最大外旋直前で最大値を迎える」という複数の先行研究に共通して報告された特徴 (Feltner M et al., 1986 Fleisig GS et al., 1995) から大きく逸脱したトルクカーブが計測された試技についても除外した。

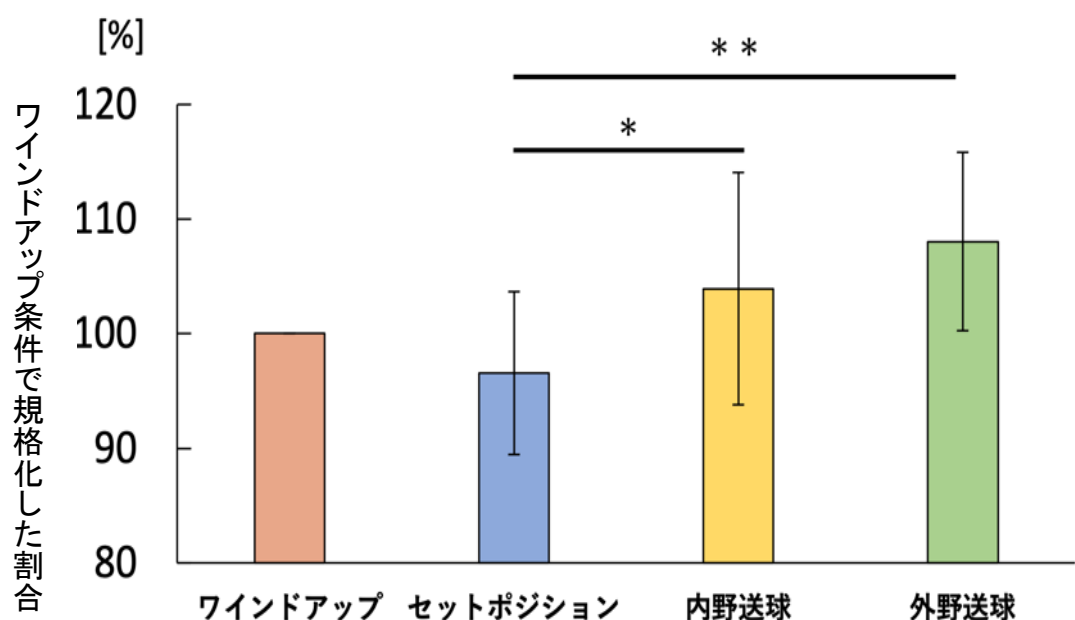
2.5 統計処理

肘関節最大内反トルク値と球速に対して、各選手の各条件における平均値を算出し、代表値とした。代表値に対して、同一実験参加者における異なる条件間の差異を検討するための統計処理として反復測定一元配置分散分析を実施し、有意差が見られたデータに対しては事後検定として Bonferroni 法を用いた。有意確率はそれぞれ危険率を 5%未満と設定し、統計処理には SPSS Statistics ver.28.0.0.0 (IBM 社製) を使用した。

第3章 結果

3.1 肘関節最大内反トルク値

除外基準を参照した結果、30人中16名の参加者の600球中261球の試技が分析対象となった。肘関節最大内反トルク値はワインドアップ条件、セットポジション条件、内野送球条件、外野送球条件の順に $26.1 \pm 12.2\text{Nm}$ 、 $24.8 \pm 10.5\text{Nm}$ 、 $26.4 \pm 10.5\text{Nm}$ 、 $27.7 \pm 11.1\text{Nm}$ であり（図5）、ワインドアップ条件を100%として規格化するとセットポジション条件、内野送球条件、外野送球条件の順に $97 \pm 7\%$ 、 $104 \pm 10\%$ 、 $108 \pm 8\%$ であった。反復測定一元配置分散分析の結果、条件間に有意差が認められた ($p=0.002$)。また、事後検定の結果、内野送球条件はセットポジション条件より有意に大きく ($p=0.008$)、外野送球条件はセットポジション条件より有意に大きかった ($p<0.001$)。



* : $p<0.01$, ** : $p<0.001$

図5. ワインドアップを100%とした肘関節内反トルクの偏移

3.2 球速

除外基準を参照し、30人中16名の参加者の600球中261球の試技が分析対象となった。球速はwindアップ、セットポジション、内野送球、外野送球の順に $98 \pm 9 \text{ km/h}$ 、 $96 \pm 9 \text{ km/h}$ 、 $98 \pm 7 \text{ km/h}$ 、 $102 \pm 11 \text{ km/h}$ であった (図 6)。反復測定一元配置分散分析の結果、条件間に有意差が認められた ($p < 0.001$)。事後検定の結果、windアップ条件はセットポジション条件より有意に大きく ($p = 0.018$)、外野送球条件はwindアップ条件およびセットポジション条件より有意に大きかった ($p = 0.009$, $p = 0.006$)。

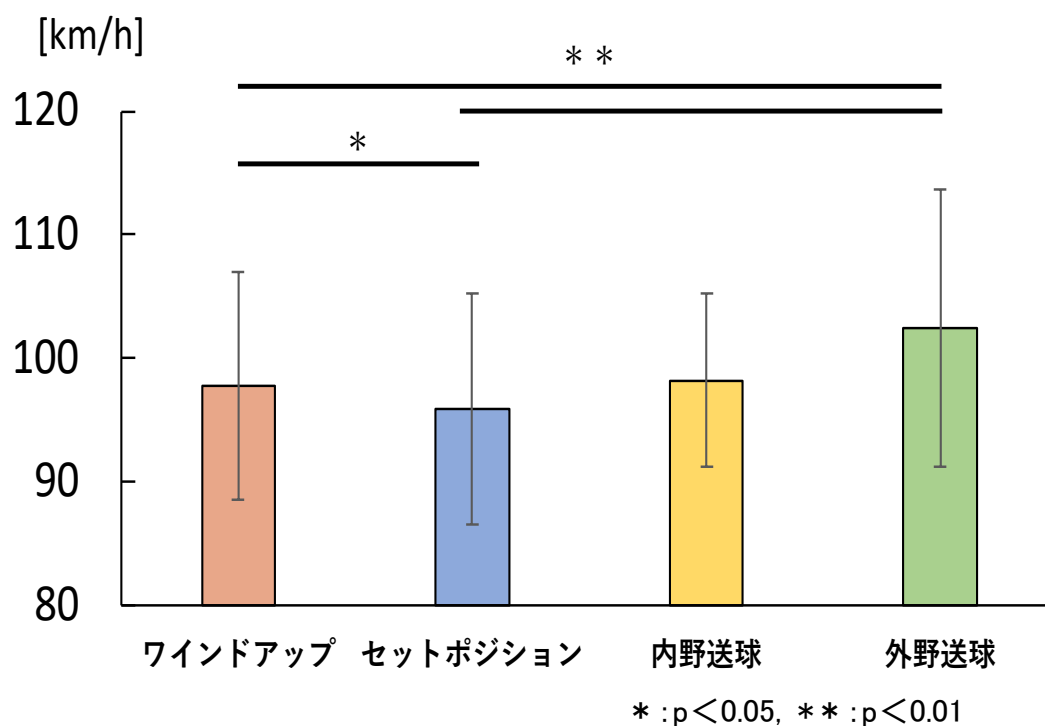


図 6. 各条件における球速の偏移

第4章 考察

本研究の目的は、投球した際の肘関節内反トルクを算出し、投手の用いる投球様式と野手が用いる投球様式との間で肘関節内反トルクを比較することであった。内野手・外野手が用いる投球様式では、投手が用いるセットポジションからの投球と比較して肘関節内反トルクが増大したことが示された。この結果は、野手が用いる投球様式の方が投手が用いる投球様式よりも肘関節内反トルクが大きい、という本研究の仮説を部分的に支持するものである。また、外野手が用いる投球様式では投手が用いるワインドアップやセットポジションからの投球と比較して球速が増大し、投手が用いるワインドアップからの投球はセットポジションからの投球と比較して球速が増大したことが示された。

4.1 肘関節最大内反トルク値の信頼性と妥当性

本研究では、すべての参加者が4条件において5球ずつの試技を実施した。そこで、同一参加者で同一条件の試技によって得られた肘関節最大内反トルク値は同等であることを前提として、級内相関係数を用いた信頼性分析を行った。なお、本研究のデータ分析では外れ値を除外したために、分析対象者によっては試技数が異なる条件が生じたこと、ならびに1人の検者が実験環境を設定してデータ取得までを実施したことを考慮し、一元配置変量モデルを用いた単一測定値に対する級内相関係数を信頼性分析の手法として採用した。その結果、全条件を対象とした分析による級内相関係数（単一測定値）は0.886であった。条件ごとの分析ではワインドアップ条件、セットポジション条件、内野送球条件、外野送球条件の順に0.914、0.925、0.846、0.880であった。いずれも0.8以上の結果であり、信頼性の高いデータであったことが示された。先行研究では健常成人が投球した際の肘関節最大内反トルクは $100 \pm 20 \text{Nm}$ (Feltner et al., 1986)、

64±12Nm (Fleisig et al., 1995)、86±17Nm (Oi et al., 2019) と報告され、本研究における中学生野球選手の肘関節最大内反トルクは先行研究の 26～41%程度であった。同年代の投球動作を対象とした複数の先行研究において報告された肘関節内反トルクは 28±7Nm (Fleisig et al., 1999)、27±12Nm (Nissen et al., 2007) であり、本研究の肘関節内反トルクはその標準偏差内に含まれる値であった。さらに、年齢による球速の相違に着目した先行研究(勝亦ら, 2008)において報告された同年代の野球選手の平均球速(12～13 歳: 87.1±10.4 km/h、14～15 歳: 101.9±9.0 km/h)の範囲内に本研究におけるワインドアップ条件の球速(13.6±1.1 歳: 98±9 km/h)が含まれることを考慮すると、本研究における対象者の球速は年齢と比べて標準的であったと考えられる。以上のことから、本研究において算出された肘関節最大内反トルクのデータは当該対象者層の一般的な値を示すものと考えられる。

本研究では「1 セグメントモデル」を用いて IMU センサから得られるデータから肘関節内反トルクを算出した。この方法はモーションキャプチャシステムを利用した「2 セグメントモデル」や「3 セグメントモデル」と比較して、測定環境の構築や算出方法が簡便である一方、方法論としての妥当性には限界が 2 点存在する。1 つ目は可動性がある手関節を不動のものと仮定しているため、手関節まわりのトルクを肘関節内反トルクと合わせて算出してしまうことである。2 つ目は肘関節の関節座標系が設定できないため肘関節内反トルクを解剖学的な 3 成分に分解することができないため、屈曲伸展成分を含む合トルクとして算出されることである。手関節の可動性の影響は、大住(2019)が提示した最適仮想位置をセグメント重心としてモデリングすることにより解消できることが示されている。本研究で用いた逆動力学分析にはこの最適仮想重心が用いられているため、この影響は最小限であったと考えられる。「1 セグメントモデル」を使用して算出した肘関節トルクは内反成分と屈曲成分の合トルクとなっている

が、内反成分が最大となる時点の屈曲成分は極めて小さいことから、その影響は無視できるほど小さいと考えられる。実際に「3 セグメントモデル」を使用して算出された肘関節内反トルクとの相関関係（山岸ら, 2018、大住, 2019）および高い精度（大住, 2019）が確認されたことから、同一対象者内の条件間で比較した本研究の方法論については妥当性が保たれているものと考えられる。

4.2 条件間の肘関節内反トルクおよび球速の増大に対する考察

投手として用いる投球様式と野手として用いる投球様式との間で肘関節最大内反トルクを比較した結果、肘関節最大内反トルクは内野手および外野手が用いる投球様式の方が投手の用いるセットポジションからの投球よりも有意に大きいことが示された。この結果について考察する。本研究における 4 つの条件間の差は投球距離、投球動作時間、投球開始姿勢であり、投球距離は球速およびボール投射角度によって規定されと考えられる。したがって、条件間で変わり得る要素は①球速、②ボール投射角度、③投球動作時間、④投球開始姿勢の 4 つであると考えられる。どの条件でも同一の労力で投球したことを前提とすると、4 つの変数が肘関節内反トルクへどのように影響を及ぼすかは以下のように力学的に考察することができる。

①球速が増大した場合、ボールを加速させるために投球腕の角速度が増大することによって、肘関節内反トルクは増大すると考えられる。②ボール投射角度が増大した場合、体幹が後傾し前腕も後方に倒れた（後傾した）姿勢で投球することによって前腕に作用する重力によって生じるモーメントのアームが長くなり、肘関節を外反させるストレスが大きくなることによって肘関節内反トルクは増大すると考えられる。③投球動作時間が短くなった場合、身体各セグメントの回転角加速度が増大することによって、肘関節内反トルクは増大すると考えられる。④投球開始姿勢が、ゴロを捕球して体幹部を前傾させた状態からす

ぐに投球する場合、体幹の前後傾運動を投球動作に用いることが困難になるため、代償として上肢の発揮する力による貢献が大きくなることによって、肘関節内反トルクも大きくなると考えられる。

外野送球条件においてセットポジション条件と比較して肘関節内反トルクが増大したことを考察する。外野送球条件では投球距離の設定がセットポジション条件と比較して長いこと（約 3.3 倍）によって対象者の投球距離が長くなったと考えられ、肘関節最大内反トルクの平均値は 11.5% 増大、球速の平均値は 6.7% 増大した。投球距離を長くするために、対象者はボールの球速および投射角度を増大させる必要があり①球速の増大、②ボール投射角度の増大に伴うメカニズムによって肘関節内反トルクが増大したものと推察される。球速の増大については、捕球前後の助走動作によって投球動作開始時の運動量が増大することによる影響も考えられる。

内野送球条件においてセットポジション条件と比較して肘関節内反トルクが増大したことを考察する。内野送球条件ではセットポジション条件と比較して投球距離の増加（約 1.6 倍）や球速の増大（平均 2.7%）は少ないものの肘関節内反トルクは平均 7.4% 増大した。内野送球条件では③投球動作時間の減少、④投球開始姿勢が体幹前傾位であることによって生じるメカニズムによって肘関節内反トルクが増大した可能性があると考えられる。

windアップ条件においてセットポジション条件と比較して球速が増大したものの、肘関節内反トルクに変化がなかったことを考察する。本研究の対象者には投手が主ポジションではない選手が約 8 割含まれており、高度な技術を必要とするクイックモーションとよばれる投球動作時間を短縮した投手特有の投球様式を用いた選手はいなかった。一方で、windアップ条件とセットポジション条件との違いとして投球動作開始時に足を身体後方へ一歩下げる動きが挙げられる。windアップ条件ではこの動きが助走の役割を果たすことによっ

て投球方向への身体重心の速度が増大、つまり身体全体の運動量が増大するものと考えられる。身体全体の運動量増大は球速の増大に対して影響を与えている可能性が考えられる。

4.3 ポジションと肘関節障害リスクの関連

本研究の結果は、成長期野球選手において内野手および外野手によって用いられる投球様式が肘関節への負担を増大させ、肘関節障害の発生リスクを増大させる因子となることが示唆された。野手によって用いられる投球様式において1球あたりの肘関節への負担が増大することが、投手と比べて投球数が少ない野手において肘関節障害が多く発生する要因となり得ると考えられる。本研究における対象者の投球はいずれも最大努力に近い高い労力で投げられていることから、野手が用いる投球様式は高い労力で実施することによって肘関節障害の発生リスクを増大させているともいえる。したがって、肘関節障害を呈する野手は、高い労力で野手が用いる投球様式を反復している可能性があると考えられる。

選手、保護者および指導者が野球現場において具体的な対策を検討するためには、肘関節障害が肘関節への負担（外反ストレス）の回数、頻度、大きさの影響によって生じることに着目する必要があると考えられる。例えば、内野の深い位置から長距離を投げる練習によって高い労力による投球が予想される時はその回数を減らす工夫をすることができる。あるいは、外野手であれば中継プレーを積極的に使うような練習を多くすることによって1球あたりの労力を減らすことができれば安全に練習回数を多くすることができると考えられる。この時、1球あたりの労力は選手の身体的あるいは技術的特徴によって異なるため、一律の対応は難しいことを考慮する必要があると考えられる。

4.4 本研究の限界

本研究の主な限界は 3 つ考えられる。1 つ目は、努力度の統一が困難であったことである。各参加者の内野送球条件および外野送球条件において努力度に相違が生じる可能性が排除できなかったことである。その原因は、windアップ条件とセットポジション条件では「全力に近い」と指示した一方で、内野送球条件と外野送球条件では同様の指示をせず、「公式戦で走者をアウトにするように」と教示した点にある。参加者の捉え方によっては、参加者の能力に応じて投球の際に力強く投球すること以上にコントロールを意識しながら投球する可能性、つまり、最大努力でない投球動作が観察される可能性が本研究の限界点として懸念された。しかしながら、内野送球条件と外野送球条件はwindアップ条件とセットポジション条件と比べて平均球速は大きかった。努力度を変化させた投球動作に関する先行研究では努力度の低下に伴い球速が低下することが報告されている (Melugin et al., 2019 Fiegen et al., 2023)。したがって、内野送球条件と外野送球条件でも努力度は十分に高まっており、本研究における条件ごとの努力度の差は小さく、全ての条件において「全力に近い」努力度であったと考えられる。

2 つ目は、投手が試合で用いる「マウンド」を用いなかったことである。マウンドの有無によって肘関節内反トルクの変化を検討した研究は複数あり、9~14 歳の投手を対象に肘関節内反トルクが増大するとする報告 (Nissen et al., 2013) と高校生の投手を対象に肘関節内反トルクに変化がないとする報告 (Dowling et al., 2020) がある。本研究においては対象者に野手も含まれていたため、マウンドを使用することによって不慣れた環境での投球データを取得してしまう可能性があった。このことから、平地での投球データを収集した実験設定は本研究の対象者の性質上最も適していたものと考えられる。

3つ目は、一般化できる選手の年齢が中学生年代に限定されることである。年齢の低い小学生年代においては本研究の対象者と体格や競技経験年数が対象者によって大きく異なることが考えられる。年齢の高い高校生以上の年代においては特定のポジションに特化した練習を重ねた結果として体格や投球送球技術にポジション差が生じるものと考えられる。これらの要因から、本研究の有効性は中学生年代に限定されるものと考えられる。

第5章 結論

本研究では、成長期野球選手において投手・野手が用いる複数の投球様式によって生じる肘関節最大内反トルクを比較した。その結果、外野送球条件ではセットポジション条件と比較して球速と肘関節内反トルクが増大し、内野送球条件ではセットポジション条件と比較して肘関節内反トルクが増大することが示された。野手が用いる投球様式が高い労力で反復されることによって、野手の肘関節障害の発生リスクを増大させていることが推察された。

参考文献

- Atwater A.E. (1979). Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 7(1), 43-86.
- Barnes D.A., Tullos H.S. (1978). An analysis of 100 symptomatic baseball players. *The American Journal of Sports Medicine*, 6(2), 62-67.
- Brogdon B.G., Crow N.E. (1960). Little leaguer's elbow. *American Journal of Roentgenology*. 83(4), 671-675.
- Camp C.L., Tubbs T.G., Fleisig G.S., Dines J.S., Dines D.M., Altchek D.W., Dowling B. (2017). The relationship of throwing arm mechanics and elbow varus torque. *The American Journal of Sports Medicine*. 45(13). 3030-3035.
- Dowling B., McElheny K.D., Camp C.L., Ling D.I., Dines J.S. (2020). Effects of mound versus flat-ground pitching and distance on arm mechanics and elbow torque in high school pitchers. *The Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 8(12), 1-6.
- Feltner M., Dapena J. (1986). Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2, 235-259.
- Fiegen A.P., Nezlek S.P., Loushin S.R., Christoffer D., Verhoeven M., Kaufman K.R., Camp C.L. (2023). Changes in elbow stress and ball velocity during reduced effort pitching a marker-based motion capture analysis. *The American Journal of Sports Medicine*. 51(3), 779-785.
- Fleisig G.S., Andrews J.R., Dillman C.J., Escamilla R.F. (1995). Kinetics of Baseball Pitching with Implications About Injury Mechanisms. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(2), 233-239.

- Fleisig G.S., Barrentine S.W., Zheng N., Escamilla R.F., Andrews J.R. (1999). Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *Journal of Biomechanics*, 32, 1371-1375.
- Fleisig G.S., Bolt B., Fortenbaugh D., Wilk K.E., Andrews F. R. (2011). Biomechanical comparison of baseball pitching and long-toss: implications for training and rehabilitation. *Journal of Orthopaedic & Sports physical therapy*, 41(5), 296-303.
- Lyman S., Fleisig G.S., Waterbor J.W., Funkhouser E.M., Pulley L., Andrews J.R., Osinski E.D., Roseman J.M. (2001). Longitudinal study of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(10), 1803-1810.
- Matsuura T., Suzue N., Kashiwaguchi S., Arisawa K., Yasui N. (2013). Elbow injuries in youth baseball players without prior elbow pain: A 1-year prospective study. *The Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 1(5), 1-4.
- Melugin H.P., Larson D.R., Fleisig G.S., Conte S., Fealy S.A., Dines J.S., D'Angelo J. (2019). Baseball pitchers' perceived effort does not match actual measured effort during a structured long-toss throwing program. *The American Journal of Sports Medicine*, 47(8), 1949-1954.
- Mosteller F., Parunak A., (2006). Identifying Extreme Cells in a Sizable Contingency Table: Probabilistic and Exploratory Approaches. In *Exploring data tables, trends, and shapes* [electronic resource]. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience.
- Nissen C.W., Westwell M., Ounpuu S., Patel M., Tate J.P., Pierz K., Burns J.P., Bicos J. (2007). Adolescent baseball pitching technique: a detailed three-

- dimensional biomechanical analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(8), 1347-1357.
- Nissen C.W., Solomito M., Garibay E., Ounpuu S., Westwell M. (2013) . A biomechanical comparison of pitching from a mound versus flat ground in adolescent baseball pitchers. *Sports Health*, 5(6), 530-536.
- Oi T., Yoshida S., Dun S., Slowik J., Diffendaffer A., Takagi Y., Tanaka H., Nobuhara K., Fleisig G.S. (2019). Biomechanical differences between Japanese and American professional baseball pitchers. *The Otrhopaedic Journal of Sports Medicine*, 7(2), 1-8.
- Olsen S.J., Fleisig G.S., Dun S., Loftice J., Andrews J.R. (2006). Risk factors for shoulder and elbow injuries in adolescent baseball pitchers. *The American Journal of Sports Medicine*, 34, 905-912.
- Slowik J.S., Aune K.T., Diffendaffer A.Z., Cain E.L., Dugas J.R., Fleisig G.S. (2019). Fastball velocity and elbow-varus torque in professional baseball pitchers. *Journal of Athletic Training*, 54(3), 296-301.
- 梅野侑, 川村卓, 奈良隆章, 島田一志, 下山優. (2011). 野球の外野手における送球動作の特徴～投球と送球動作の比較～. 日本コーチング学会第 22 回大会特別論文集. 52-53.
- 大住 祐也. (2020) 慣性センサを用いた肘関節外反ストレス算出のための投球腕のモデリング. 早稲田大学スポーツ科学研究科 2019 年度修士論文.
- 蔭山 雅洋, 鈴木 智晴, 岩本 峰明, 中島 一, 前田 明. (2015). ワインドアップポジションとセットポジションからのストレートによる投球のバイオメカニクスの比較: 高校野球選手における投球速度および投球動作中の下肢と体幹に着目して. *体育学研究*, 60, 737-757.

- 勝亦 陽一, 金久 博昭, 川上 泰雄, 福永 哲夫. (2008). 野球選手における投球スピードと年齢の関係. スポーツ科学研究, 5, 224-234.
- 加藤 健太郎, 立石 学, 遠藤 剛, 岡邨 直人, 関根 裕之, 田中 康雄, 大野 健太, 山本 智章. (2011). 少年野球選手のポジション別障害の現状報告～2009 年野球検診より～. 関東甲信越ブロック理学療法士学会, 30 (0), 157-157.
- 全日本野球協会, 日本整形外科学会, 運動器の 10 年・日本協会. (2017). 平成 28 年度中学野球（軟式・硬式）実態調査報告書. <https://www.bjd-jp.org/wp/wp-content/uploads/2019/02/h28.pdf>, (アクセス日: 2023 年 12 月 23 日)
- 高橋 啓, 古島 弘三. (2020). 学童野球トップレベル選手に実施した野球肘検診の結果. 日本肘関節学会雑誌, 27(2), 278-281.
- 帖佐 悦男. (2015). 野球肘検診の普及－産官学連携の役割とその取り組み－. 臨床スポーツ医学, 32(7), 608-612.
- 日本プロフェッショナル野球組織, 全日本野球協会. (2022). 公認野球規則. ベースボール・マガジン社, 東京都.
- 宮西 智久, 櫻井 直樹, 遠藤 壮. (2015). 守備位置の異なる野球選手の投球動作のキネマティクスの比較: 体幹と投球腕に着目して. 体育学研究, 60(2), 551-564.
- 宮西 智久, 藤井 範久, 阿江 通良, 功力 靖雄, 岡田 守彦. (1995). 大学野球選手における速投および遠投動作の 3 次元比較研究. 体育学研究, 40, 89-103.
- 山岸 謙一, 矢内 利政, 鳴尾 丈司, 柴田 翔平. (2018). 1 セグメントモデルを用いて投球時の外反ストレスを推定する方法論. スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, (0), A-33.

謝辞

本研究は、指導教員である矢内利政教授のご指導の下に行われました。初学者であった私に対して、バイオメカニクス分野の導入から研究指導に至るまで、懇切丁寧にご指導いただきました。ご指導いただいた内容だけでなく、そのプロセスからは教育の本質を学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。

熊井司教授、広瀬統一教授、杉本大輔准教授におかれましては、お忙しい中にも関わらず快く副査をお引き受けいただきました。苦しい時期に先生方から温かいお言葉をいただき、心から救われる思いでした。本当にありがとうございます。

すでに修了、卒業されている方々を含め、矢内研究室のメンバーには、研究関連の相談や研究室運営、日頃生活のことまで、幅広く相談に乗っていただきました。皆さん大変にお世話になりました。

実験を行うにあたり、地元の中学生硬式野球チーム「飯田リトルシニア」の指導者、保護者、および選手の皆さんに大いにご理解、ご協力を賜りました。貴重な練習の合間に時間を作ってください、心より御礼申し上げます。

最後に、大学院進学にあたって理解を示して協力してくれた父と母、一番近くでサポートしてくれた妻と息子たちに心より敬意を表し、感謝いたします。

2024年2月14日 佐々木陽平