

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04007

研究課題名(和文) 野球肘のリスク軽減とパフォーマンス維持を両立する投球動作の解明

研究課題名(英文) Analysis of baseball pitching and the risk of elbow injury

研究代表者

矢内 利政 (Yanai, Toshimasa)

早稲田大学・スポーツ科学大学院・教授

研究者番号：50387619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：全投手が肘関節ストレスを低下させ得たものの、球速を維持しつつ肘関節ストレスを大幅に低下(>10 Nm)させ得た投手は29%であった。肘関節ストレス軽減と球速維持を両立し得た投球フォームの特徴は、(a)コッキング期の肩甲骨後方傾斜角が大きく、(b)順次到達する肩甲骨、上腕、前腕の最大角速度が全て小さく、(c)最大肘屈曲トルクと最大肩水平内転トルクが小さいことであった。この結果は、投球時肘ストレスを軽減させ得る投球フォームは存在するものの、それを大幅に低下させつつ球速を維持する投球フォーム(上肢部位の回転速度を減少させつつ手部速度を維持する運動連鎖)の学習は容易ではないことを示すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肘関節ストレスという自己認識できない生体情報をリアルタイムでフィードバックすることによる運動学習効果を運動連鎖の協調的変化として提示できたことに学術的意義がある。さらに、球速を維持しつつ肘関節ストレスを大幅に低下させ得る投球メカニクスの特徴を、外傷障害の有無や個人差を排除した被験者内変動として抽出できたことは、投球メカニクスと肘関節ストレスを直接関連付け、運動力学的な因果関係を導き出すことを可能にする点で大きな意義がある。一方、球速維持と肘関節ストレス低下を両立させ得た投手が全体の約3割にとどまったことは、これらを両立させる投球フォームを学習する方法をさらに発展させる必要性を示すものとなった。

研究成果の概要(英文)：All participants were able to reduce valgus stress, but only 29% were able to reduce elbow joint stress by >10 Nm when pitching fastballs at the same velocity. These pitchers successfully accomplished the two tasks (reducing elbow valgus stress while pitching fastballs at the same velocity) by altering the sequential motion of the kinetic chain. Specifically, they (a) tilted the scapula of the pitching limb posteriorly to a larger extent during the cocking phase, (b) reduced the sequentially achieved maximum angular velocities of the scapula, upper arm, and forearm, and (c) reduced the maximum elbow flexion torque and maximum shoulder horizontal adduction torque during the acceleration phase. These results indicate that although elbow valgus stress can be reduced by altering the pitching mechanics, motor learning of an effective pitching mechanics is not easily accomplished.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：肘外反ストレス 野球 投手 投球動作 バイオフィードバック

1. 研究開始当初の背景

米国大リーグ機構（MLB）の投手を対象にした研究によると、肘障害は障害全体の30%を占め（Posner et al, 2011）、その外科的治療法である『Tommy John 手術』の件数は年々増加し（Cain Jr et al, 2010、Hodgins et al, 2016）、これによる損失はMLBだけでも数百億円に達するという。日本も例外ではなく、プロ野球で高い実績を有する一流投手からアマチュア投手まで幅広いレベルの選手がこの障害による深刻な打撃を受けており、その予防は野球界における最重要課題となっている。野球肘の危険因子として、過度の投球、疲労時の投球、コンディショニング不足、幼少期における変化球の多投などが挙げられているが、投球フォームに問題の根源があるとするエビデンスも多い（Aguinaldo et al., 2009; Oyama et al., 2013; Urbin et al., 2012; Werner et al., 2002）。解剖学的にみて、野球肘の主な損傷部位である内側側副靭帯に負荷を加えるのが外反方向への荷重であることから、投球時の運動連鎖により発生する外反ストレスが野球肘の力学的原因とされ、投球フォームの特徴が外反ストレスの大きさに個人差をもたらすことが報告されている。したがって、外反ストレスを軽減させ得る投球フォームを習得することが野球肘予防の原点となるのであるが、これを実現する効果的な実践方法は確立されていない。その理由のひとつは、外反ストレスの大きさが自己認識できないことにある。自己認識できない生体情報を計測し、それを意識上にフィードバックすることにより、体内状態を意識的に調節することを可能とする技術や現象を総称してバイオフィードバックという（日本バイオフィードバック学会）。1970年代に治療法や運動学習法としてのバイオフィードバック活用が紹介（Shapiro & Schwarts, 1972）されて以来、病の治療や健康増進という臨床方面への応用が有用であることに加え、スポーツ選手のパフォーマンス向上にも役立つことが示されている。昨年、我々の研究室で開発している電磁ゴニオメータを用いた動作解析システムに外反ストレス即時算出機能とフィードバック機能を追加搭載することに成功した。実用実験において、被験者となった野球経験者は主観的な投球強度と外反ストレスの関連を学習し、外反ストレスを軽減させることができたため、本研究ではこれを用いて運動学習させるという介入方法を導入することにした。

2. 研究の目的

野球選手に頻発する投球障害は、肘関節の内側側副靭帯やその付着部の損傷を主とした疼痛性障害で『野球肘』と呼ばれる。その発症原因が投球時に発生する肘関節内側部への力学的荷重（外反ストレス）であることは広く知られているものの、それを軽減し野球肘を予防する効果的な実践方法は確立していない。外反ストレスの大きさが自己認識できないことや、ストレス軽減への取り組みがパフォーマンス低下を招く恐れのあることがその主な原因と考えられる。本研究の目的は、①投球時外反ストレスの増減と投球フォームとの関連を1投球毎のバイオフィードバックにより運動学習させる方法論を提案し、②運動学習過程で球速増大やストレス軽減に取り組んだ際の手部軌道の変化や複数関節運動の協調的変化を明らかにすることにより、③ストレスを軽減させる投球フォームやこれと球速の維持・増大を両立させる投球フォームの運動学的特徴およびそのメカニズムを明らかにすることであった。

3. 研究の方法

プロ野球投手、社会人野球投手、大学野球投手のそれぞれについて、20～40名を対象として投球動作解析およびバイオフィードバックプログラムを実施した。投球動作の計測には電磁ゴニオメータを用い、その計測値から各投球について外反ストレスを算出した。投球パフォーマンス（球速・回転数等）の定量化には自動球質計測器を用いた。各投手には、①主観的な投球強度と外反ストレスの関連性、②球速と外反ストレスの関連性、③球速を大きく変化させることなく外反ストレスを軽減する投球フォームについてフィードバックした。

投球パフォーマンスを維持しつつ外反ストレスを軽減させることを可能にするメカニズムは、機械工学的側面と運動制御学的側面の両面から考察した。機械工学的考察はニュートン・オイラーの運動法則に基づいた力学的因果関係の解析として行い、運動制御的考察はシナジー（複数制御変数の協調的関係）の変化を対象とした解析として、各被験者固有の関節可動性や運動連鎖を踏まえて行った。

4. 研究成果

（1）計画された研究の成果

繰り越し年度を含む4年間に実施した研究は新型コロナウイルス感染症拡大と蔓延防止対策等による対面実験自粛により必ずしも当初の計画通りには進まなかったものの、この自粛期間に実験を実施するために取り組んだ新システムの開発やオンラインを通じた国際共同研究等により想定を上回る範囲への波及効果をもたらす成果をあげることができた。まず、計画された研究について報告する。投球実験に参加した投手はプロ野球、社会人野球、大学野球の投手計80名であった。参加した全投手について肘関節ストレスが低下させ得ることが示されたものの、肘関節ストレス低下を実現した投球の大半は球速も同時に低下したものの、あるいは球速を維持したものの

ストレス低下の程度が限定的 ($<5 \text{ Nm}$) なものであった。球速を維持しつつ (通常投球 $37.3 \pm 0.26 \text{ m/s}$; 低ストレス投球 $37.0 \pm 0.25 \text{ m/s}$) 肘関節ストレスを大幅に低下 ($>10 \text{ Nm}$: 約 20%) させ得た投手は 23 名 (29%) であった。これらの投球動作を分析したところ、肘ストレスの低い投球を行った際には、(i) コッキング期後期の肩甲骨後方傾斜角 (通常投球 $0 \pm 2^\circ$; 低ストレス投球 $4 \pm 2^\circ$) ならびに protraction 角 (通常投球 $1 \pm 1^\circ$; 低ストレス投球 $3 \pm 1^\circ$) が大きく、(ii) 順次到達する肩甲骨通常投球 ($22.7 \pm 0.2 \text{ rad/s}$; 低ストレス投球 $22.1 \pm 0.2 \text{ rad/s}$)、上腕 (通常投球 $62 \pm 2.3^\circ$; 低ストレス投球 $57 \pm 2.4^\circ$)、前腕 (通常投球 $62 \pm 0.9^\circ$; 低ストレス投球 $60 \pm 0.7^\circ$) の最大角速度が全て小さく、(iii) コッキング期後期に発揮される最大肩水平内転トルク (通常投球 $85 \pm 12 \text{ Nm}$; 低ストレス投球 $73 \pm 12 \text{ Nm}$) と加速期に発揮される最大肘屈曲トルク (通常投球 $121 \pm 3.4 \text{ Nm}$; 低ストレス投球 $115 \pm 3.4 \text{ Nm}$) が小さく、(iv) リリース時の肩関節内旋角速度 (通常投球 $61 \pm 1.8 \text{ rad/s}$; 低ストレス投球 $57 \pm 1.9 \text{ rad/s}$) と水平内転角速度 (通常投球 $7.2 \pm 2.1 \text{ rad/s}$; 低ストレス投球 $6.7 \pm 2.2 \text{ rad/s}$) が共に小さいことが確認された。これらの結果は、同じ球速の速球を肘関節ストレスの小さい投球フォームで投じた際には、コッキング期において肩甲骨を含む体幹部から肩複合体への運動連鎖が円滑に行われ、この肩甲骨を含む体幹・投球腕の『しなり』の度が増していたことと、ならびに上肢の回転速度に依存しない投球フォームで投じていたことを示すものである。この特徴に加速期における肘関節の最大屈曲関節トルクが減少していたことを加味すると、投球動作における腕の回転半径を大きくした投球フォームになっていたものと考えられる。つまり、上肢の各セグメントの回転速度を低下させる分、それらセグメントの運動が描く弧の回転半径を増大させて投球することによって肘ストレスの低い投球フォームを実現していたことを示すものである。コッキング期における肩甲骨を含む体幹部から肩複合体への運動連鎖および肩甲骨を含む体幹・投球腕の『しなり』に着目して分析した研究成果の一部は、国際学術誌に掲載された (Yanai, T. et al., *Scand J Med Sci Sports* 2023)。

以上より、本研究課題の計画当時に立案した仮説の検定結果を以下にまとめる。

① 『各投手について、球速を大きく変化させることなく投球時肘関節外反ストレスを軽減させ得る投球フォームは存在する』という仮説は支持された。しかしながら、肘関節外反ストレスを大幅に低下 ($>10 \text{ Nm}$: 約 20%) させ得た投手は全体の 1/4 程度にとどまった。

② 『投球時外反ストレスの軽減と投球パフォーマンス (球速・回転数) の維持を両立できる投球フォームは、関節運動の協調的変化によって手部の軌跡を変化させることなく身体セグメントの運動連鎖や肩甲骨上腕リズムを改善することによって習得される』という仮説は、『手部の軌跡を変化させることなく』という部分を除き支持された。

肘関節ストレスという自己認識できない生体情報をリアルタイムでフィードバックすることによってもたらされる運動学習効果を運動連鎖の協調的変化として提示できたことは実用的な意義がある。さらに、球速を維持しつつ肘関節ストレスを大幅に低下させ得る投球メカニクスの特徴を外傷障害の有無や個人差を排除した被験者内変動として抽出できたことは、投球メカニクスと肘関節ストレスを直接関連付け、運動力学的な因果関係を導き出すことを可能にする点で大きな学術的な意義がある。一方、球速維持と肘関節ストレス低下を両立させ得た投手が全体の約 3 割にとどまったことは、これらを両立させる投球フォームを学習する方法をさらに発展させる必要性を示すものとなった。

(2) 対面実験自粛期間がもたらした研究成果

新型コロナウイルス拡大と蔓延防止対策等による対面実験自粛により必ずしも当初の計画通りには進まなかったものの、この自粛期間に実験を実施するために取り組んだ新システムの開発やオンラインを通じた国際共同研究の実施等により、想定を大きく上回る範囲への波及効果をもたらす成果をあげることができた。そのような成果を 3 つ挙げる。第 1 は、実験者と対象者が接触することなく肘関節ストレスをバイオフィードバックするための方法論として無線式慣性センサと携帯端末を用いた新システムを開発したこと、およびこのシステムの開発が産学連携研究に発展したことである。この新システムの開発により、対象者は、自身で慣性センサを前腕部に貼付し、専用アプリをインストールした自身の携帯端末を用いることで、実験者の介入なしで肘関節ストレスをいつでもどこでも投球毎に確認できるようになった。さらにこの開発が産学連携研究に発展したことにより、他の機能を追加装備するシステムにグレードアップできることに加え、将来的には野球実践現場に広く普及させる機会を得ることになった。

2 つ目は、米国球界における肘障害予防策について Major League Baseball (MLB) 関係者とオンラインで情報交換する機会を設けたことがきっかけとなり、日米プロ野球 2 球団における障害調査研究を実施するに至ったことである。この調査研究は 2015-2019 年度における障害発生状況を MLB 球団 Los Angeles Angels と日本プロ野球球団広島カープの間で比較する形式でまとめ、その成果は国際学術誌に掲載された (Crotin, RL, Yanai, T. et al. *Orthop J Sports Med* 2021)。

もう一つは、投球肘障害を規定する因子として新たに注目すべき身体機能を本研究で収集分析したデータから発案し、この変数を測定するための新しい方法を開発したことである。その身体機能は投手の肘関節内反筋力で、投球時に肘関節に加わる外反荷重に抗うことのできる筋力の強さを定量化するものである。それまで投球時の外反荷重に抗うのは肘内側側副靭帯をはじめとする関節構造体であると考えられていたのであるが、本研究におけるデータ収集中に複数のプロ野球主力投手が、①変化球 (スライダ) に『しっかりと回転をかけて』投じた際や②『低

め(のコース)に強い球を投げた』際に計測された肘関節内反トルクが大きく上昇する傾向を示したことから、関節トルクは外反荷重に抗うためだけでなく、ボールを投じるために必要な力を投手が能動的に発揮することにも起因して増減するのではないかと発想したことから、この筋力に着目することとなった。計測方法は、等速性筋力測定装置 Biodex と B モード超音波診断装置を用いて行う精密なものであるが、これにより各投手の内反筋力を再現性高く計測できるようになった。この研究成果は国際学術誌に掲載された (Onuma, K. & Yanai, T. *J Biomech* 2023)。現在、投手が投球した際の肘関節ストレスの大きさと同投手の肘関節内反筋力を比較検討する研究を進めており、その最初の成果としてまとめた論文(肘関節内反筋力の計測値を用いて各投手の肘障害リスクを評価する方法論)が国際学術誌にて査読審査を受けているところである。この方法論を活用し、各投手の肘障害リスクの評価および障害予防に役立つ研究に発展させる計画である。

(3) むすび

本研究プロジェクトの計画当時は、野球選手に頻発する投球障害の発症原因が投球時に発生する肘関節内側部への力学的荷重(外反ストレス)であり、これを軽減する投球動作を見つけないことが野球肘を予防する効果的な実践方法であると考えられていたが、現在はこれに加えて投手の有する内反筋力を増強することの重要性にも目を向けるべきことが分かってきた。新たなパラダイムの発見である。野球肘の予防と撲滅に向けた取り組みとして、①肘外反ストレスを減少させる投球動作の習得と②肘内反筋力の増強という 2 本柱の必要性を提案して、本プロジェクトを完了する。

<引用文献>

- ① Aguinaldo, A. L., & Chambers, H. (2009). Correlation of throwing mechanics with elbow valgus load in adult baseball pitchers. *Am J Sports Med*, 37(10), 2043–2048. doi:10.1177/0363546509336721
- ② Cain, E. L., Jr., Andrews, J. R., Dugas, J. R., Wilk, K. E., McMichael, C. S., Walter, J. C., 2nd, . . . Arthur, S. T. (2010). Outcome of ulnar collateral ligament reconstruction of the elbow in 1281 athletes: Results in 743 athletes with minimum 2-year follow-up. *Am J Sports Med*, 38(12), 2426–2434. doi:10.1177/0363546510378100
- ③ Crotin, R. L., Yanai, T., Chalmers, P., Smale, K. B., Erickson, B. J., Kaneoka, K., & Ishii, M. (2021). Analysis of Injuries and Pitching Performance Between Major League Baseball and Nippon Professional Baseball: A 2-Team Comparison Between 2015 to 2019. *Orthop J Sports Med*, 9(5), 23259671211008810. doi:10.1177/23259671211008810
- ④ Hodgins, J. L., Vitale, M., Arons, R. R., & Ahmad, C. S. (2016). Epidemiology of Medial Ulnar Collateral Ligament Reconstruction: A 10-Year Study in New York State. *Am J Sports Med*, 44(3), 729–734. doi:10.1177/0363546515622407
- ⑤ Onuma, K., & Yanai, T. (2023). A method for measuring muscle strength in restraining valgus joint angulation: Elbow varus muscle strength against valgus loading. *Journal of Biomechanics*, 147, 111427. doi:https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111427
- ⑥ Oyama, S., Yu, B., Blackburn, J. T., Padua, D. A., Li, L., & Myers, J. B. (2013). Effect of excessive contralateral trunk tilt on pitching biomechanics and performance in high school baseball pitchers. *Am J Sports Med*, 41(10), 2430–2438. doi:10.1177/0363546513496547
- ⑦ Posner, M., Cameron, K. L., Wolf, J. M., Belmont, P. J., Jr., & Owens, B. D. (2011). Epidemiology of Major League Baseball injuries. *Am J Sports Med*, 39(8), 1676–1680. doi:10.1177/0363546511411700
- ⑧ Urbin, M. A., Fleisig, G. S., Abebe, A., & Andrews, J. R. (2013). Associations between timing in the baseball pitch and shoulder kinetics, elbow kinetics, and ball speed. *Am J Sports Med*, 41(2), 336–342. doi:10.1177/0363546512467952
- ⑨ Werner, S. L., Murray, T. A., Hawkins, R. J., & Gill, T. J. (2002). Relationship between throwing mechanics and elbow valgus in professional baseball pitchers. *J Shoulder Elbow Surg*, 11(2), 151–155. doi:10.1067/mse.2002.121481
- ⑩ Yanai, T., Crotin, R., & Du, T. (2023). Proximal to distal sequencing impacts on maximum shoulder joint angles and the risk of impingement in baseball pitching involving a scapular independent thoracohumeral model. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. doi:10.1111/sms.14374

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yanai Toshimasa, Crotin Ryan, Du Tanghuizi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Proximal to distal sequencing impacts on maximum shoulder joint angles and the risk of impingement in baseball pitching involving a scapular independent thoracohumeral model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/sms.14374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Crotin Ryan L., Yanai Toshimasa, Chalmers Peter, Smale Kenneth B., Erickson Brandon J., Kaneoka Koji, Ishii Masaya	4. 巻 9
2. 論文標題 Analysis of Injuries and Pitching Performance Between Major League Baseball and Nippon Professional Baseball: A 2-Team Comparison Between 2015 to 2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Orthopaedic Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/23259671211008810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Onuma, Kengo Yanai, Toshimasa	4. 巻 in press
2. 論文標題 A method for measuring muscle strength in restraining valgus joint angulation: Elbow varus muscle strength against valgus loading	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2022.111427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Onuma, K. and Yanai, T.
2. 発表標題 elbow varus muscle strength resisting valgus loadings in young adult men including baseball pitchers
3. 学会等名 2023 American College of Sports Medicine annual meeting（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Los Angeles Angeles	University of Utah	Rothman Orthopaedic Institute