

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

身体運動科学研究領域

5018A015-7 大住 祐也

研究指導教員：矢内 利政 教授

【緒言】野球では投球が頻繁に行われる。この投球動作が適切に行われない場合、投球側の肩関節や肘関節などへの障害リスクが増加すると示唆されている（Lyman et al., 2002）。アメリカのプロ野球リーグであるメジャーリーグでは、肘関節内側部の障害、特に内側副靱帯損傷によりプレーから離れる選手が年々増加していることが報告されており（Conte et al., 2016）、野球選手における肘の障害が多いことがわかる。

肘関節内側部に生じる障害は投球時に内側副靱帯やその付着部に作用する引張応力が原因であると考えられている。この引張応力の大きさを示唆する指標として、投球動作中の肩関節最大外旋時前後に出現する肘関節内反トルクの最大値が参照されている（Fleisig et al., 1995; Anz et al., 2010）。この内反トルクは肩関節最大外旋時に前腕が上腕に加える外反荷重に対抗するために、手根屈筋群や回内筋、内側副靱帯等が発揮する力に起因するトルクである。本研究ではこの値を肘関節内側障害のリスクを示唆する指標として用いるため、『外反ストレス』と呼ぶこととする。この外反ストレスを計測することで、投球時の肘関節内側部の障害リスクを評価することができ、より障害リスクが小さい投球フォームを構築するための有益な情報となりうる。

投球時の外反ストレスを報告した研究では身体部位の3次元座標位置から逆動力学法を用いて外反ストレスなどの算出を行っている。この算出においては各身体部位を剛体と仮定した様々な投球腕のモデルが用いられている。中でも、Feltner and Dapena (1989) や Fleisig et al. (1996) が定義したボール・手部・前腕を1つの剛体としたモデルを用いることで、1つの慣性センサを用いて外反ストレスの計測を行うことができる。このモデルにおける慣性係数の推定方法は複

数報告されている。山岸ら（2018）は阿江ら（1992）の身体慣性係数を用いてボール・手部・前腕を1つの剛体としたモデルの慣性係数の推定を行った。このモデルにより1つの慣性センサを用いて外反ストレスを算出し、その算出値が真値よりも有意に大きいこと、及び両者の間に強い相関があることを報告した。これは手関節の運動を考慮しないことで、ボールや手部の重心加速度が過大評価される可能性が高いためだと考えられる。

この問題を解決するための方法の1つとして、このモデルの慣性係数を推定する際に入力するボール・手部複合体の重心位置を真値に近い外反ストレスが算出できる最適位置に設定することが考えられる。したがって、本研究の目的はボール・手部・前腕を合わせて1つの剛体とし、ボール・手部複合体の重心位置を手部上で仮想的に移動させた投球腕のモデル（以下、1剛体モデル）から算出される外反ストレスが真値に近づく最適なボール・手部の仮想重心位置を算出することとした。また、算出されたボール・手部の仮想重心位置を適用したモデルを用いて慣性センサの出力値から算出される外反ストレスの精度を検証することとした。

【方法】被験者は中学野球投手20名、高校野球投手13名、野球経験のある大学生13名とした。光学式3次元動作解析システムを用いて被験者の身体表面に貼付した反射マーカーの3次元座標位置を計測した。撮影速度は250Hzに設定した。また、被験者の前腕遠位部に慣性センサをベルト型の固定具を用いて装着した。慣性センサのサンプリング周波数は1000Hzであった。外反ストレスの算出において2つのモデルを定義した。1つは3剛体モデルであり、ボール・手部複合体、前腕、上腕の3つの剛体から成るモデルとした。このモデルから算出された外反ストレスを本研究で

は真値とした。もう 1 つのモデルは 1 剛体モデルであり、ボール・手部・前腕複合体の 1 剛体から成るモデルとした。この 1 剛体モデルにおいて、ボール・手部複合体の重心位置を手関節中心を 0%、第 3 中手骨上を 100% として 1% ずつ移動させ、各重心位置を適用した 1 剛体モデルから外反ストレスを算出した。このようにして算出された外反ストレスと真値との差が最も小さくなる重心位置を被験者群ごと、球種ごとに平均値を算出した。このようにして求めた手部重心位置の平均値を当該被験者群および球種群における「最適仮想手部重心位置（VOP）」と記す。

算出された最適仮想手部重心位置の平均値の差を検定するために二元配置分散分析を行った。また、1 剛体モデルから算出された外反ストレスおよび慣性センサの出力値から算出された外反ストレスと真値との差を検定するために対応のある t 検定を行った。さらに、慣性センサから算出された外反ストレスと真値の信頼性を検定するために、級内相関係数を算出した。それぞれの有意水準は $p < 0.05$ とした。

【結果】 最適仮想手部重心位置について、データ数が少なかった球種は others としてまとめ、速球、カーブボール、スライダー、チェンジアップ、others の 5 種類を算出した。二元配置分散分析の結果、年代間で有意な差は見られなかった。球種についてはカーブボールとチェンジアップの間に有意な差が見られた ($p < 0.05$)。したがって、全年代における速球・カーブボール・スライダーの 3 球種の平均値 (3types)、チェンジアップ (CH) の平均値、others の平均値を算出した (表 1)。表 2 で示された最適仮想手部重心位置を適用した 1 剛体モデル (以下、最適仮想モデル) から算出した外反ストレスと真値との差は $2.4 \pm 2.1 \text{ Nm}$ となった。最適仮想モデルから算出された外反ストレスと真値との差を対応のある t 検定により検定したことろ、群間に有意な差は見られなかった ($p > 0.05$)。この結果は表 1 で示された最適仮想モデルを用いることで、正確に 1 剛体モデルから正確に外反ストレスを算出できることを示している。

慣性センサの出力値から定義された最適仮想モデルから算出された外反ストレスと真値との間の誤差は $6.6 \pm 5.2 \text{ Nm}$ となった (図 1)。これらの値の信頼

性を検定するために、級内相関係数を求めたところ、 0.841 と有意な高い信頼性が確認された ($p < 0.01$) が、対応のある t 検定の結果、有意な差が見られた ($p < 0.01$)。

【考察】 本研究で算出された最適仮想モデルを用いることで簡易的かつ正確に外反ストレスを算出できることが明らかとなった。したがって、モーションキャプチャや高速度カメラを用いた投球分析において、手関節中心と肘関節中心の 2 点の 3 次元座標位置を取得することで外反ストレスを算出できることを示している。また、慣性センサを用いた外反ストレスの算出においては真値との間に有意な差が見られたものの、高い信頼性が見られた。したがって、野球の実践現場においても慣性センサを用いて外反ストレスの評価を行うことが可能であると考えられる。

表 1 全年代における球種別の
最適仮想手部重心位置

	3types	CH	others
VOP (%)	47.5 ± 1.6	41.7 ± 4.3	46.8 ± 2.1

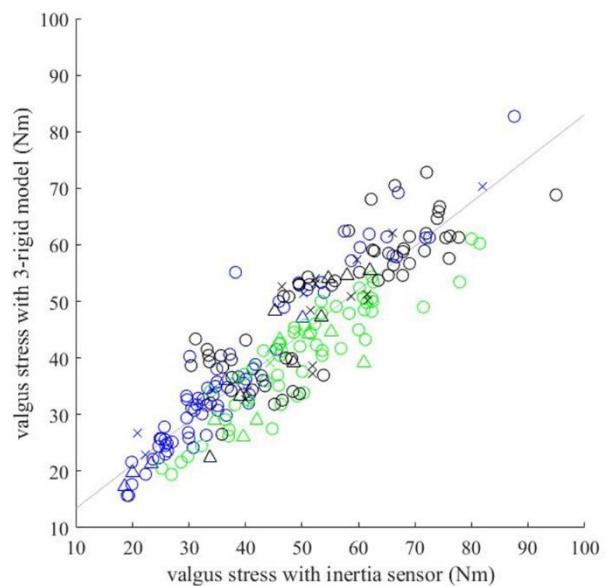


図 1 慣性センサにより定義された最適仮想モデルから算出された外反ストレスと真値 (プロットの色は対象の年代 (青 : 中学生群、緑 : 高校生群、黒 : 大学生群)、形は球種 (○ : 3types、△ : CH、× : others) を示す。