

## 肘内側側副靭帯損傷が橈骨および尺骨関節内応力分布に与える影響

本谷 和俊<sup>1</sup> 船越 忠直<sup>1</sup> 古島 弘三<sup>2</sup> 門間 太輔<sup>1</sup>  
大泉 尚美<sup>3</sup> 伊藤 恵康<sup>2</sup> 但野 茂<sup>4</sup> 岩崎 倫政<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院整形外科 <sup>2</sup>慶友整形外科病院スポーツ医学センター

<sup>3</sup>整形外科北新病院上肢人工関節・内視鏡センター

<sup>4</sup>北海道大学大学院工学研究院人間機械システムデザイン部門

### The Influence on Stress Distribution Patterns of the Radius and Ulnar Joint Surface with Ulnar Collateral Ligament Injury Assessed by Computed Tomography Osteoabsorptiometry

Kazutoshi Hontani<sup>1</sup> Tadanao Funakoshi<sup>1</sup> Kozo Furushima<sup>2</sup> Daisuke Momma<sup>1</sup>  
Naomi Oizumi<sup>3</sup> Yoshiyasu Itoh<sup>2</sup> Shigeru Tadano<sup>4</sup> Norimasa Iwasaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hokkaido University Graduate School of Medicine, Department of Orthopaedic Surgery

<sup>2</sup>Sports Medical Center, Keiyu Orthopaedic Hospital

<sup>3</sup>Upper Extremity Center of Joint Replacement and Endoscopic Surgery, Hokushin Hospital

<sup>4</sup>Division of Human Mechanical Systems and Design, Hokkaido University School of Engineering

本研究の目的は CT osteoabsorptiometry 法 (CTOAM 法) を用いた応力分布解析により内側側副靭帯 (MCL) 損傷を伴う野球選手の肘関節外反不安定性が肘関節遠位の応力分布に与える影響を検討することである。対象は大学硬式野球部に所属する症状のない投手 5 名 (投手群), MCL 再建術前の投手 5 名 (MCL 群), コントロールとして野球経験のない健常ボランティア 4 名 (コントロール群) とした。CTOAM 法を用いて肘関節における軟骨下骨の高密度領域を検討し各群間で比較検討した。その結果, MCL 群および投手群ではコントロール群に比べ, 橈骨および尺骨関節面後方の高密度領域が有意に広範囲であった。さらに MCL 群では投手群に比べ, 尺骨後外側で高密度領域が有意に広範囲であった。本研究結果から肘外反不安定性が肘頭疲労骨折の発生に関連する可能性が示唆された。

#### 【結 言】

投球動作では cocking 期から acceleration 期にかけて, 過剰な肘外反ストレスが加わることが知られている。Fleisig らは投球動作により生じる肘外反ストレスにおいて 64 Nm のうち約 54% が肘内側側副靭帯 (MCL) にかかることを報告している<sup>1)</sup>。近年, overhead-throwing athletes とりわけ野球選手における MCL 損傷と肘頭疲労骨折 (Olecranon stress fracture, OSF) が高率に合併するとの報告が散見されるが<sup>2,4)</sup>, MCL 損傷と OSF の関連については, 未だ不明な点が多い。一方, MCL 損傷や OSF などの投球肘障害の原因や予防方法を考えるうえで, 投球動作が肘関節に与える力学的環境を明らかにすることは不可欠である。Muller らは軟骨下骨骨密度が長期の力学的環境を反映するという理論のもとに CT osteoabsorptiometry 法 (CTOAM 法) を用いることで長期の力学的環境を推測可能であると報告している<sup>5)</sup>。CTOAM 法は CT 画像を用いて

関節軟骨下骨の骨密度を測定することで関節の応力分布を類推するものである。CTOAM 法を用い無症候性野球選手における上腕骨遠位関節面の応力分布解析を行い, 投手において上腕骨小頭前方および滑車後方に応力が集中することを報告されている<sup>6)</sup>。しかし, CTOAM 法を用いて症候性肘外反不安定性が肘関節の応力分布に与える影響については不明であった。

われわれは MCL 損傷が肘関節内応力分布を変化させるという仮説を立てた。本研究の目的は CTOAM 法を用いた応力分布解析により野球選手の MCL 損傷による症候性肘関節外反不安定性が肘関節, 特に橈骨と尺骨関節面の応力分布に与える影響を検討することである。

**Key words** : stress distribution (応力分布), computed tomography (CT), ulnar collateral ligament (肘内側側副靭帯)

**Address for reprints** : Kazutoshi Hontani, Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine, Kita 15, Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 060-8638 Japan

【対象および方法】

対象：対象は14名男性，平均19.4歳（14～22歳）で，大学硬式野球部に所属する症状のない投手5名（投手群），MCL再建術前の投手5名（MCL群），コントロールとして野球経験のない健常ボランティア4名（コントロール群）の3群に分け検討した．年齢・利き腕・野球歴・投球頻度を調査し，過去3年以内に投球側上肢に明らかな外傷，手術の既往があるものは除外した．本研究では高解像度（matrix, 512×512）ヘリカルCT装置（Aquilion One; Toshiba Medical Systems, Otawara, Japan）を用い，肘関節axial像を撮影した．CT撮影条件は，slice thickness・intervalはそれぞれ1mmとしtable speedは1mm/sとした．研究は本学の倫理委員会の承認を得たのち，全ての被験者にインフォームドコンセントを得て行われた．

CTOAM法：以前の報告と同じくCTOAM法により軟骨下骨骨密度を評価した．まず，得られたCT axial画像をもとに3D-CTに再構築し，さらにこの3D-CTを1mm間隔のsagittal像に再構築する．次いで，われわれが独自開発したソフトウェア（Osteo Dens 4.0）を用い，得られたsagittal像のCT画像を解析する．計測対象である橈骨および尺骨関節面の軟骨下骨領域を十分に注意して選択し，最大の軟骨下骨骨密度を自動的に計算した．X線の減衰量を水を0とし空気を-1000とするHounsfield units（HU値）の計測をスライスごとに同定された軟骨下骨に対して行い，この作業をスライスごとに繰り返し行うことで関節面全体のHU値を含む軟骨下骨密度の分布を計測することができる．計測されたHU値を最大値から最小値までの9等分とし関節表面の2D mapping像に再構築した（図1）．

データ解析：CT値1800を超える領域を高密度領域と設定し，高密度領域が全体の面積に占める割合を用いて定量的評価を行った．CT値1800を

超える高CT値領域の面積（s）がそれぞれの領域の面積（S）に占める割合（ $s/S = \% \text{ high density area, \%HDA}$ ）を求め3群間を統計的に比較した．橈尺骨近位関節面を橈骨頭（RA），尺骨前外側（AL），尺骨前内側（AM），尺骨後外側（PL），尺骨後内側（PM）の5つの領域に分け分析した（図2）．

3群間の比較および統計的差異に関してはANOVAおよびTukey's methodを用い有意差を検討した． $P$ 値<0.05を有意差ありとした．

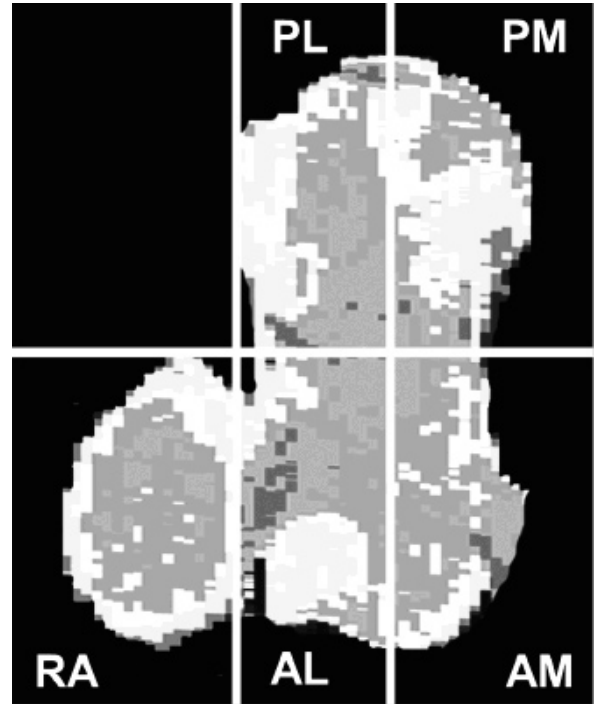


図2 定量評価：関節面を橈骨頭（RA），尺骨前外側（AL），尺骨前内側（AM），尺骨後外側（PL），尺骨後内側（PM）の5つの領域にわけ，それぞれの領域における% MA（淡色の部分）を計測する．

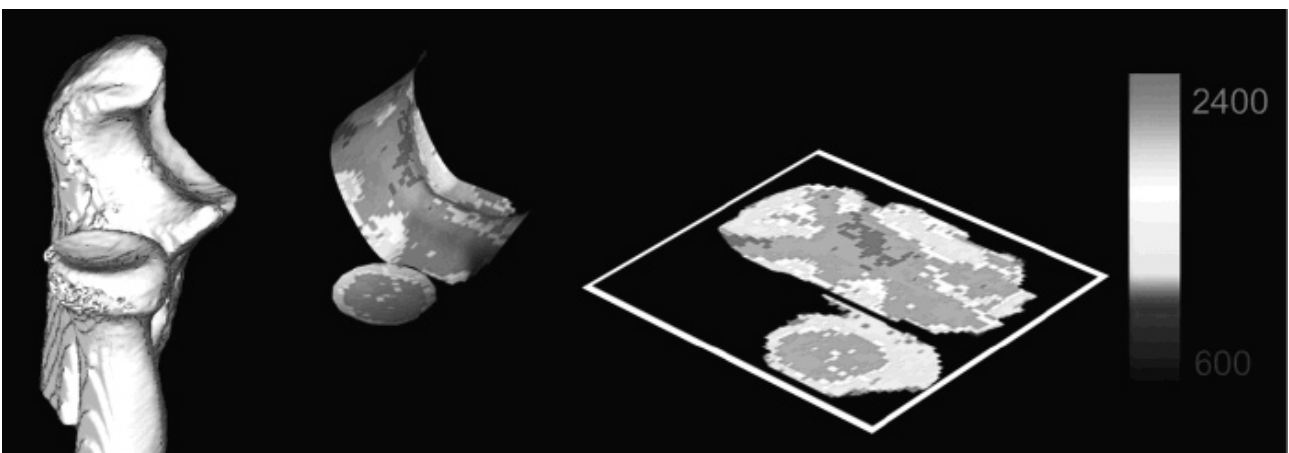


図1 CTOAM法：得られた3D-CTを1mm間隔のsagittal像に再構築し，スライスごとに軟骨下骨の領域を自動的に同定する．HU値の計測を行い，関節面全体を描出する．定量的に評価するためHU値を9段階のカラースケールに分割した関節表面のイメージ像に再構築する．

【結 果】

全体 (Total) および全ての領域で投手群と MCL 群はコントロール群に比べ %HDA が有意に高値であったが、投手群と MCL 群に有意差は認めなかった。尺骨後外側 (PL) においてのみ MCL 群は投手群に比べ、%HDA が有意に高値であった (図 3,4)。

【考 察】

屍体を用いた肘関節の応力解析は過去にいくつか散見されるが、従来の力学試験においては力学条件の設定が複雑であるため投球動作を再現することは困難である。本研究では、投球動作という特殊な力学的環境下での応力解析を行うため、投球動作を再現することなく長期の関節内応力を推測できる CTOAM 法を応用した。本研究結果より肘外反不安定性と橈尺骨関節面の応力分布に関して、投球動作により尺骨関節面後方の応力集中が起こることが明らかになった。さらに、外反不安定性を伴う症例においては尺骨関節面後外側に有意な応力集中が起こることが示された。

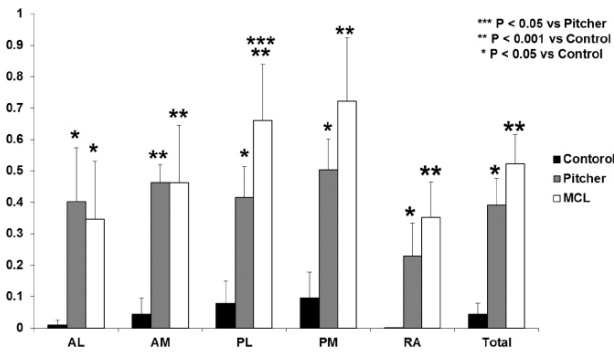


図 3 各領域における対象群間の比較。  
 尺骨前外側 (AL) : \* $P < .05$  vs 対照群,  
 尺骨前内側 (AM) : \*\* $P < .001$  vs 対照群,  
 尺骨後外側 (PL) : \* $P < .05$  vs 対照群,  
 \*\* $P < .001$  vs 対照群, \*\*\* $P < .05$  vs 野手群,  
 尺骨後内側 (PM) : \* $P < .05$  vs 対照群,  
 \*\* $P < .001$  vs 対照群,  
 橈骨頭 (RA) : \* $P < .05$  vs 対照群,  
 \*\* $P < .001$  vs 対照群,  
 関節面全体 (Total) . \* $P < .05$  vs 対照群, \*\* $P < .001$

Wilson らは valgus extension overload により尺骨後内側に応力が集中し、肘頭に骨棘が形成されると報告している<sup>7)</sup>。本研究でも投手群において尺骨関節面後方に応力集中を認めており、これは長期間の投球動作の繰り返しにより生じたと推測される。さらに今回、肘外反不安定性を伴う群において尺骨後外側に応力集中を認めたことから、肘外反不安定性は、follow-through phase における valgus extension overload を増強することで、肘頭と肘頭窩の不適合性を引き起こし、その結果、尺骨後外側に応力集中がシフトした可能性が示唆された。

古島らは OSF に MCL 損傷が高率に合併していることを報告しており、OSF と MCL 損傷において、同様の機序が発症に関与することを示唆している<sup>3)</sup>。OSF は野球、やり投げ、テニス、バレーボールなどの overhead throwing athlete でみられるが、その中で競技人口の多い野球において発生数が最も多く、日常の診療でも稀ならず遭遇する。疲労骨折は筋疲労や靭帯損傷などにより、骨に対する応力負荷が増大した結果もたらされるが、投球動作では繰り返される外反、過伸展ストレスおよび付着する筋群による牽引ストレスなどが強く影響している。本研究の結果は肘外反不安定性を有する投手において投球動作により尺骨後外側に過剰な力学的負荷がかかることを示し、OSF の病因あるいは進行に肘外反不安定性が影響することを示唆する。このことは、MCL 再建などの治療により肘外反不安定性を取り除くことが OSF の予防に有用であることを示唆しており、近年散見される MCL 再建術による良好な成績を支持するものである。CTOAM 法による関節内応力分布解析は肘頭疲労骨折などの投球肘障害の理論的背景となりうることを示された。本研究の限界として、CTOAM 法が相対的な応力解析手法である点を考慮しなくてはならない。さらに、本研究では投手群に潜在する外反不安定性の評価をしていない。投球動作における肘関節の力学的環境をさらに理解するためには、今後、術前後の外反動揺性の評価や MCL 再建後の follow-up、年齢による比較、CTOAM 法の 3 次元解析などが必要であると考えられた。

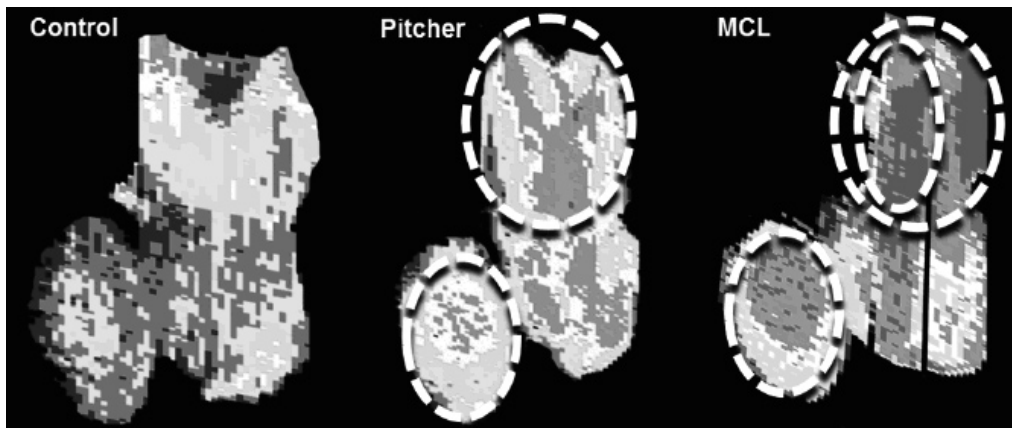


図 4 各群における高密度領域の分布

## 【結 語】

本研究では大学硬式野球部に所属する症状のない投手5名(投手群), MCL再建術前の投手5名(MCL群), コントロールとして野球経験のない健常ボランティア4名(コントロール群)に対しCTOAM法による肘関節応力分布解析を施行した。MCL損傷を伴う投手で尺骨関節面後外側にさらなる応力集中が認められ, 過去の報告における滑車後方の応力集中と相関する結果であった。MCL損傷投手の関節内応力分布パターンは肘関節後方の不適合性を示唆し, 肘頭骨折などの理論的背景になると考えられた。

## 【文 献】

- 1) Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, et al : Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 1995 ; 23 : 233-9.
- 2) Suzuki K, Minami A, Suenaga N, et al : Oblique stress fracture of the olecranon in baseball pitchers. *J Shoulder Elbow Surg.* 1997 ; 6 : 491-4.
- 3) Furushima K, Itoh Y, Iwabu S, et al : Classification of Olecranon Stress Fractures in Baseball Players. *Am J Sports Med.* 2014 ; 42 : 1343-51.
- 4) Paci JM, Dugas JR, Guy JA, et al : Cannulated screw fixation of refractory olecranon stress fractures with and without associated injuries allows a return to baseball. *Am J Sports Med.* 2013 ; 41 : 306-12.
- 5) Muller-Gerbl M, Putz R, Hodapp N, et al : Computed tomography-osteodensitometry for assessing the density distribution of subchondral bone as a measure of long-term mechanical adaptation in individual joints. *Skeletal radiol.* 1989 ; 18 : 507-12.
- 6) Momma D, Iwasaki N, Oizumi N, et al : Long-term stress distribution patterns across the elbow joint in baseball players assessed by computed tomography osteodensitometry. *Am J Sports Med.* 2011 ; 39 : 336-41.
- 7) Wilson FD, Andrews JR, Blackburn TA, et al : Valgus extension overload in the pitching elbow. *Am J Sports Med.* 1983 ; 11 : 83-8.