

速球とカーブの投球におけるボールリリース前後の前腕運動の比較

斎藤 健治・仰木 裕嗣*・市川 浩**
足立 和隆・宮地 力・高井 省三

Comparison of Forearm Motion Before and After Ball-Release between Fast Ball and Curve Ball Pitches

SAITOU Kenji, OHGI Yuji*, ICHIKAWA Hiroshi**,
ADACHI Kazutaka, MIYAJI Chikara and TAKAI Shozo

This study aims to compare the pronation of forearm before and after the ball-release between fast ball pitch and curve ball pitch in baseball pitching. The subjects were five college baseball pitchers. The angular velocity of pronation was measured by the accelerometer device attached on the wrist of subjects. This device consisted of a pair of accelerometers arranged in each of 3 dimensional axes. The angular velocity was detected by subtracting the acceleration signals which were measured by two accelerometers arranged on the same axis. In both pitch types, pronation of forearm occurred before and after the ball-release, and the maximum angular velocity of pronation was observed after the ball-release. From the results of statistical analysis, 1) the angular velocity at ball-release of the fast ball pitch was significantly larger than the curve ball pitch, 2) there was no significant difference about maximum angular velocity between both pitch types, 3) time from the ball-release to arrival of the maximum angular velocity of the curve ball pitch was significantly larger than the fast ball pitch. From the results of the curve ball pitch, that is required supination position of the forearm before the ball-release, pronation of the forearm after the ball-release is motion which occurs generally in spite of the pitch type. Furthermore, in the curve ball pitch, torsion may occurs at the elbow joint by torsional moment at the distal and proximal portion of the upper extremity.

Key words: Fast Ball, Curve Ball, Forearm Motion, Angular Velocity, Accelerometer

I. はじめに

野球の投球動作分析は、上肢を対象に筋電図法や画像分析法を用いたものが多数報告されてきた^{2,7,10-12,14,16,17,20,21}。近年では、3次元画像分析により関節角度や角速度を求めた kinematics 的研究や関節力や関節トルクを求めた kinetics 的研究が進んできている。

それらによると、投球時のボールリリース前後

には、肩の内旋角速度が $6100 \sim 7550 \text{ deg/s}$ ^{3,5,7,16}、肘の伸展角速度が $2200 \sim 4600 \text{ deg/s}$ など非常に高速であることが定量的に明らかにされている^{3,7,16}。しかし、Barrentine et al.² が述べているように、ボールリリース前後の前腕の回内運動は比較できる先行研究が少なく、その現象やメカニズムについて未だ詳細に言及できる段階ではない。

前腕の回内外運動は手の運動と互いに従属関係

* 慶應義塾大学環境情報学部 Faculty of Environmental Information, Keio University

** 筑波大学大学院体育科学研究科 Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

にある⁹。手(およびボール)は投球のリリース局面で最大の速度を獲得する必要がある部分であるため、その影響としてフォロースルー期に大きな前腕の運動が起こることは容易に想像できる。一方、手の運動は速度の獲得だけではなく、変化球を投げる上でも重要になってくる。速球とカーブの投球動作を比較した研究によると、カーブの投球ではリリース時に相対的に回外位を保っているにも関わらず^{2,6,17}、リリース後は回内運動が見られる²。これらのことから、回内運動は投球に必然的に起こる運動であり、投球の総決算に近い運動と考えることができる。

本研究は、リリース前後の前腕回内(および前腕長軸回りの内旋)の角速度を加速度計を用いて計測し、速球とカーブの投球間で比較した。そして、リリース前後の前腕の運動の共通点と相違点を明らかにし、リリース後に強い前腕回内運動を生じさせるメカニズムについて考察した。さらに、そのメカニズムを前提に、カーブの投球が肘関節障害を誘発する可能性についても検討した。

II. 方法

1. 被験者および実験試技

被験者は筑波大学硬式野球部に所属する右投げ投手5名であった。被験者に、正規の距離18.44mで捕手に向かって投球を行わせた。投球数は速球5球、カーブ5球であった。投球スピード測定にはスピードガン(PSK Professional, トーアスポーツマシーン社製)を用いた。また、被験者側から高速度カメラ(HSV200, NAC社製)を用いて投球フォームの撮影を行った。

2. 角速度計測

1軸の圧電型加速度計(TEAC社製501FB)6個を用いて被験者の投球腕手首で投球時の加速度を計測した。直交する3軸を構成するアルミ製アングルの各軸上に、感度方向を合わせた加速度計を2個ずつ10cm離して固定した。また、それぞれの軸上の加速度計の感度方向は直交する方向であった(Fig. 1)。それぞれの加速度計で計測される加速度信号は、

$$\begin{aligned} A_{1z} &= g_z - \ddot{R}_z + r_z(\omega_x^2 + \omega_y^2) \\ A_{1x} &= g_x - \ddot{R}_x + (r_x + d)(\omega_z^2 + \omega_y^2) \\ A_{1y} &= g_y - \ddot{R}_y + r_y(\omega_z^2 + \omega_x^2) \\ A_{2z} &= g_z - \ddot{R}_z + (r_z + d)(\omega_x^2 + \omega_y^2) \\ A_{2x} &= g_x - \ddot{R}_x + r_x(\omega_z^2 + \omega_y^2) \\ A_{2y} &= g_y - \ddot{R}_y + (r_y + d)(\omega_z^2 + \omega_x^2) \end{aligned} \quad (1)$$

である(Fig. 2)。ここで、 g_x, g_y, g_z は重力加速度、 $\ddot{R}_x, \ddot{R}_y, \ddot{R}_z$ は並進加速度、 r_x, r_y, r_z は直交軸原点から加速度計(x1, y1, z1)までの距離、 d はペアとなる加速度計間の距離(10cm)、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は各軸まわりの角速度である。

各軸まわりの角速度はペアの加速度計により検出される加速度信号の差をとることによって、

$$\begin{aligned} \omega_z &= \sqrt{\frac{(A_{2z} - A_{1z}) + (A_{2y} - A_{1y}) - (A_{2x} - A_{1x})}{2d}} \\ \omega_y &= \sqrt{\frac{(A_{2y} - A_{1y}) + (A_{2z} - A_{1z}) - (A_{2x} - A_{1x})}{2d}} \\ \omega_x &= \sqrt{\frac{(A_{2x} - A_{1x}) + (A_{2z} - A_{1z}) - (A_{2y} - A_{1y})}{2d}} \end{aligned} \quad (2)$$

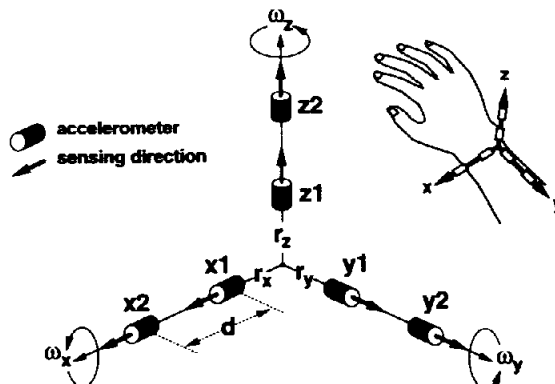


Fig. 1 Angular velocity was measured by device consisted of six accelerometers. The device was attached to the subject's right wrist as y-axis of the device matched to the long axis of the forearm.

となる¹⁵⁾。式(2)を用いて求めた各軸回りの角速度の波形例をFig.3に示す。このように、式(2)から求めた角速度はその符号が得られないため、

正の値のみとなっている。したがって、回転の方向はビデオで確認した。

加速度計測装置のx軸およびz軸は、肘関節屈

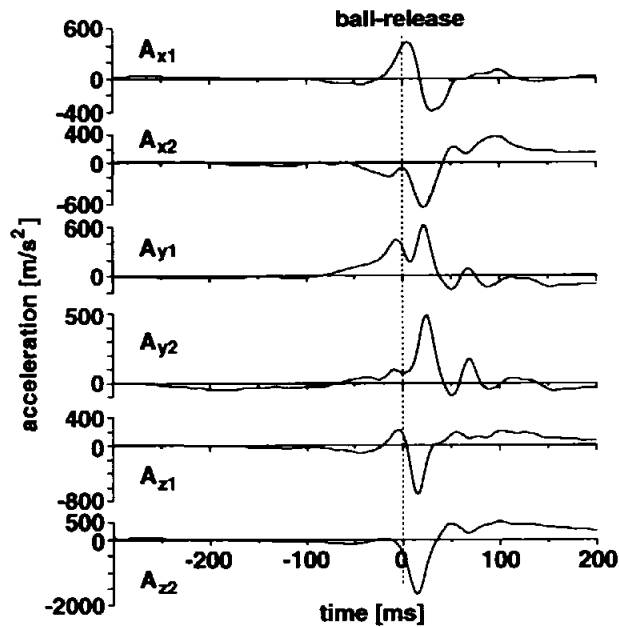


Fig. 2 Examples of the acceleration measured by each accelerometer.

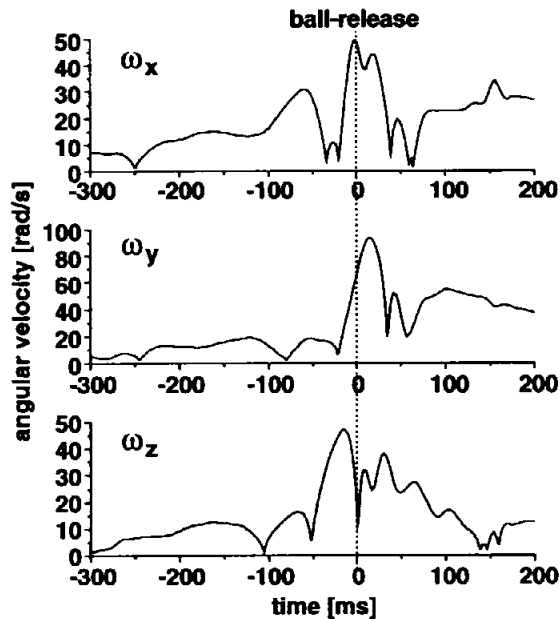


Fig. 3 Examples of angular velocity calculated by equation (2). In this study, ω_x , angular velocity of the pronation and the rotation about long axis of the forearm, was compared between the fast ball pitch and the curve ball pitch.

伸角度と前腕回内外角度の変化により、上肢の回転運動軸との関係が変化するため、ここでは取り扱わなかった。関節角度が運動により変化しても、 y 軸は前腕長軸とほぼ一致するため、この軸回りの角速度を前腕回内外(および回旋)の角速度とみなした。

加速度信号は直流アンプ(TEAC 社製 SA-610)で増幅した後、サンプリング速度 1 kHz、精度 12bit で A/D 変換し、パーソナルコンピュータ(Macintosh PowerBook 2400, Apple 社製)に取り込んだ。

3. ボールリリース時刻の検出

導通テープを被験者の人差し指と中指の指先(先端から約 5 mm)およびボールに貼り付け、指のテープはケーブルを介して電源ボックスに接続した。そして被験者がボールを握ることにより on に、指先がボールから離れることにより off になる回路を作った。ボールを投げることによってこの回路が off になった時点をボールリリース時刻とした。

4. 分析

分析のために速球、カーブともに 5 球の角速度波形から、リリース時の角速度、最大角速度、回内開始からリリースまでの時間、リリースから最大角速度に到達するまでの時間、リリース前後の回内角変位の 5 項目をパラメータとして選択した(Fig. 4)。統計分析には、 t 検定を用いた。統計計算には、統計解析ソフトウェア JMP(SAS Institute Inc.)を用いた。

Ⅱ. 結果

Fig. 5 に速球およびカーブを投球したときの、ボールリリース前後における回内角速度の波形の一例を 5 人の被験者について示す。リリース前から回内運動が始まり、リリース後に最大角速度に到達した点は被験者、球種間で共通していた。リリース時の角速度が速球の方が大きい点はすべての被験者に共通していた。被験者 E を除き、最大角速度に到達する時刻がカーブの方が遅かった。被験者 A, B および C において、カーブの回内開始時刻が速球に比べて 5 ~ 10 ms 遅れていたのに対し、被験者 D および E ではほとんど差がなかった。また、両球種の回内開始時刻は被験者 A および D で早く、被験者 B, C および E で遅めであった。最大角速度は被験者 B および D で球種間差がほとんどないのに対し、被験者 A および E では速球、被験者 C ではカーブの方が大きかった。

以上のような波形の特徴を Fig. 4 にしたがいパラメータ化し、5 人の平均値の検定結果を Table 1 に示す。リリース時の角速度は速球が 53.0 ± 11.5 rad/s、カーブが 27.4 ± 10.3 rad/s で、1% 水準で速球がカーブより有意に大きかった。最大角速度は速球が 95.4 ± 10.5 rad/s、カーブが 90.4 ± 7.5 rad/s で有意な差はなかった。回内開始からリリースまでの時間は速球が 16.9 ± 6.9 ms、カーブが 13.8 ± 9.6 ms で有意な差はなかった。一方、リリースから最大角速度に到達する時間は、速球が 14.8 ± 3.6 ms、カーブが 20.9 ± 4.5 ms で、1% 水準でカーブが有

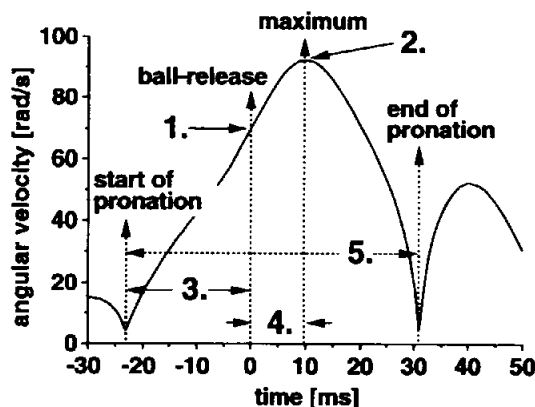


Fig. 4 Explanation of parameters for statistics analysis. 1. Angular velocity at ball release. 2. Maximum value of angular velocity. 3. Time from the start of pronation to ball release. 4. Time from the ball release to arrival of maximum angular velocity. 5. Angular displacement estimated by integrating the angular velocity from start to end of pronation.

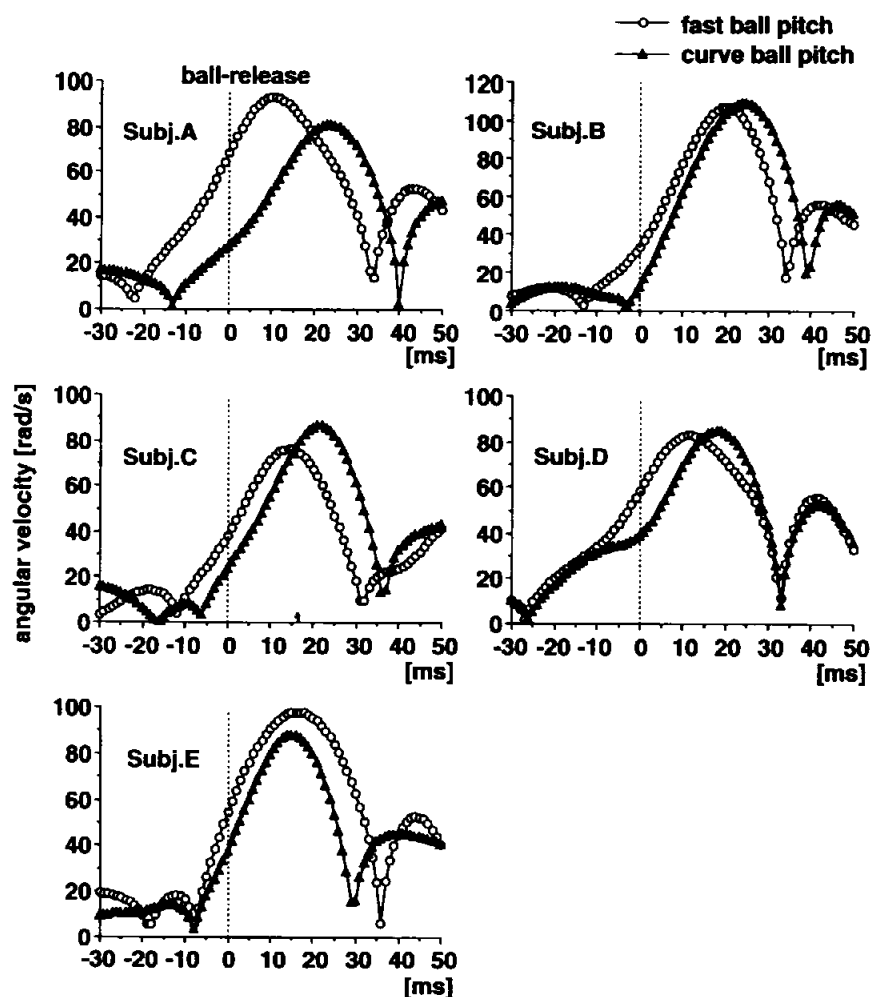


Fig. 5 Typical angular velocity of the fast ball pitch (open circle) and curve ball pitch (filled triangle) about five subjects. The abscissa shows time, the ordinate shows angular velocity.

Table 1 Comparison between the pitch types about the parameters of angular velocity

	fast ball	curve ball	
1. Angular velocity at ball release [rad/s]	53.0 ± 11.5	27.4 ± 10.3	$p < 0.01$
2. Maximum angular velocity [rad/s]	95.4 ± 10.5	90.4 ± 7.5	
3. Time from the start of pronation to ball-release [ms]	16.9 ± 6.9	13.8 ± 9.6	$p < 0.01$
4. Time from the ball release to arrival of maximum angular velocity [ms]	14.8 ± 3.6	20.9 ± 4.5	
5. Angular displacement around long axis of forearm before and after ball release [rad]	2.9 ± 0.4	2.6 ± 0.3	$p < 0.05$

意に大きかった。つまり、回内角速度が最大になる時刻はカーブが有意に遅かった。リリース前後の前腕長軸回りの角変位は速球が $2.9 \pm 0.4 \text{ rad}$ 、カーブが $2.6 \pm 0.3 \text{ rad}$ で、5%水準で速球が有意に大きかった。投球スピードは速球が $116.3 \pm 6.7 \text{ km/h}$ 、カーブが $85.9 \pm 5.5 \text{ km/h}$ で速球が有意に大きかった。

IV. 考 察

本研究の結果、速球およびカーブともに、その投球のリリース前後に回内運動が生じており、リリース後には回内運動の最大角速度を迎えた。Atwater¹⁾も同様に、球種に関わらず投球のリリース後に前腕の回内が生じると報告している。Barrentine et al.²⁾は、速球、カーブおよびチェンジアップの投球を比較して、リリース直後に極短い回外動作が起こるがその後には回内運動に転じると報告している。その他の先行研究では、肩関節の内旋や肘の伸展について報告しているが、前腕回内については分析していない場合や、リリースまでしか分析していない場合が大半を占めている。そのため、Barrentine et al.²⁾は比較検討するデータが少ないことを理由に、回内運動をリリース後に生じる現象として記述するだけで、それ以上の議論を避けている。

しかし、球種に関わらずリリース後には前腕の回内が生じるという結果からも、前腕回内は投球において必然的に起こる運動であると考えることができる。そのメカニズムは次のように説明することができる(Fig. 6a)。つまり、投球のボールリリース前30~50msに迎えるといわれる肩関節の最大外旋位から、広背筋、大円筋、肩甲下筋、烏口腕筋などの内旋筋張力により、上腕長軸まわりに角速度 ω_{v1} の内旋が生じる(この時の上腕長軸まわりの慣性モーメントを I_{v1} とする)。やや遅れて、肩関節の水平内転や体幹の回旋による遠心力および上腕三頭筋の筋張力により、肘関節の伸展が起こる。肘関節が伸展することにより、上腕長軸回りの慣性モーメントが小さくなり(I_{v2})、内旋の角速度が急激に大きくなる(ω_{v2})。リリース近辺での肘関節最大伸展位が肩関節内旋の最大角速度を引き起こし($I_{v1} \omega_{v1} = I_{v2} \omega_{v2}$, $I_{v1} > I_{v2}$, $\omega_{v1} < \omega_{v2}$)、内旋の角運動量がその後の前腕の強い回内を引き起こす($\omega_{v2} > \omega_{v3}$)。

肘関節が伸展位にあるとき、手首に固定した座

標系で見た回旋運動には、前腕の回内外運動だけでなく肩関節の内外旋の影響も含まれる。つまり、肘関節が伸展位にあれば、前腕の橈尺関節が固定されていても肩関節の内外旋、すなわち上肢長軸回りの回旋運動により見かけ上の回内外角速度が計測される。本研究では、手首に装着した加速度計だけで角速度を計測しているため、肘関節が伸展位にある時の肩関節の内旋運動の影響による角速度を分離することができない。しかし、先行研究における次のような結果から、リリース後の回内角速度は肩関節の内旋角速度からある程度独立した運動学量であるとみなすことができる。Fleisig et al.⁷⁾によると、肩関節の最大内旋角速度の時刻がリリース後約4msで肘関節の最大伸展位の時刻と一致しており、肘関節はその後屈曲に転じている。また、内旋角速度は最大値を迎えた後に急激に減速している³⁾。それにも関わらず、回内角速度はリリース後約17ms(本研究では約15ms)に最大に到達している²⁾。これらの結果は、リリース近辺においては肩関節内旋の角速度が前腕回内角速度に重畳して計測される可能性があるものの、肘関節が屈曲に転じた後に前腕で計測された角速度は純粋に回内運動によるものと考えられることを示している。

一方、Atwater¹⁾は、カーブの投球のリリース時には急激な回外運動によって上腕骨内側上顆に起始をもつ前腕屈筋群の過負荷が引き起こされ、肘関節障害につながる可能性がある旨指摘している。これに対し、近年の三次元画像解析による報告はその説を肯定していない。Sakurai et al.¹⁷⁾はリリース前の回内外角変位を速球とカーブで比較し、カーブの投球では前腕が相対的に回外位にあるものの、ともに回内運動にあるという理由からカーブの投球が肘関節障害を誘発するとは考えにくいと報告している。また、Hang⁸⁾、Sisto et al.¹⁸⁾は前腕屈筋群の表面筋電図を記録し、速球とカーブの投球で筋活動に差が認められなかったことから、カーブの投球による前腕屈筋群の過負荷は考えられないと報告している。

しかし、前述したように前腕の回内運動を肩関節の内旋力の影響と考え、カーブの投球において、短時間ではあるが高速な運動の中での回外位姿勢の維持、あるいは回内運動を遅らせることが肘関節に影響を与えないとは考えにくい。本研究の結果、カーブの投球における回内開始時刻に

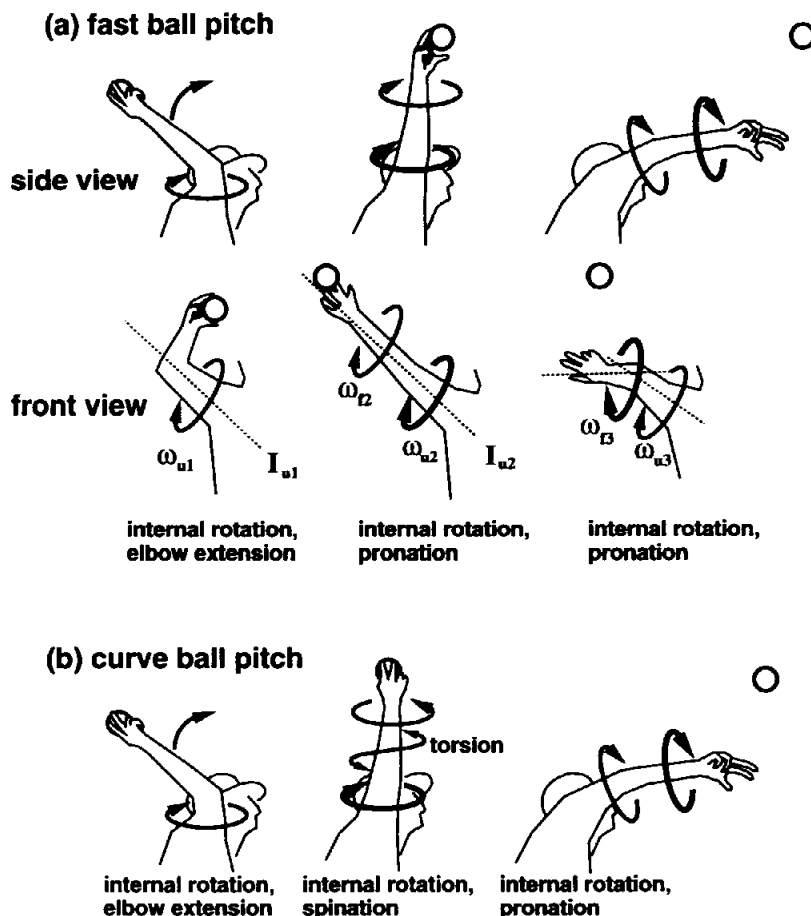


Fig. 6 Side view of upper arm and forearm motion of (a) the fast ball pitch and of (b) the curve ball pitch. The bottom figure in (a) show the front view of the fast ball pitch. I_{u1} shows the moment of inertia about the long axis of upper arm as the shoulder joint rotates internally at the angular velocity ω_{u1} before the ball-release. I_{u2} shows the moment of inertia about the long axis of upper extremity at the ball-release. At this moment, the shoulder joint rotates internally at the angular velocity ω_{u2} and forearm pronates at the angular velocity ω_{u3} . After the ball-release, the upper arm rotates internally at the angular velocity ω_{u3} and forearm pronates at the angular velocity ω_{u3} .

速球と差がなく、リリース時の角速度が速球の半分程度であった。これは先行研究の結果と同様に^{1,3,6,17}、カーブの投球では速球に比して、リリース時に前腕が回外位にあることを示している。また、リリース後の前腕回内の最大角速度には差がなく、最大角速度に到達する時間はカーブが有意に遅かった。このことから、カーブの投球では、速球と同程度の肩関節の内旋力によりリリース前後に前腕回内を強制されるにも関わらず、リリース直前ではそれを抑える運動を前腕で行っていることがわかる。この運動のためには前腕で回外モーメントを発揮する必要がある。その

結果、カーブの投球では短時間ではあるが、上肢の近位部(肩)と遠位部(手首)でねじれのモーメントを発揮することになり、肘関節部にねじれによる剪断力などの負荷が加わる可能性がある(Fig. 6 b)。

ただし、この可能性はカーブの投げ方によって異なる。指導書によると¹³、カーブの投げ方は「人差し指と中指を下方へひねる感じでボールにトップスピンをかけて投げる」のが一般的になっている(Fig. 7 a)。この場合、前腕を回外させる必要があるため回内開始が速球より遅くなる。Fig. 5 に示した被験者 A, B および C がこれに相

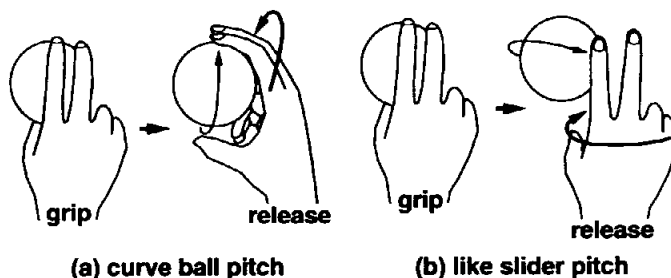


Fig. 7 The grip and release of curve ball pitch. (a) General method described by the guide book. (b) Curve ball pitch without supinating the forearm.

当すると考えられる。そして、この方法によるカーブの投球では、前述した肘関節のねじれを生じやすいと考えられる。逆に、同じブレーキングボールに含まれるスライダーに似た投げ方をする場合もある (Fig. 7 b)。すなわち、「リリースの瞬間に手首を真横にひねる、人差し指でボールを切るような感覚で横の回転を与える」といったイメージでカーブの投球をする。この投球では、前腕を回外位にする必要がないため比較的速球に近い運動になる。回内開始が速球とほぼ同時刻である被験者 D および E がこれに相当すると考えられる。この場合、前述した肘関節のねじれは生じにくいと考えられる。

また、このようなカーブの投げ方をした場合、片方の指が離れ、もう一方の指が離れるまで時間差が生じる。そのため、人差し指と中指のどちらかが離れた時刻をリリースとする本研究の検出法では、速球とカーブの差を不当に大きくしてしまう恐れがある。しかし、速球とカーブの投球時の人差し指と中指の離れる時間差を計測した報告によると¹⁹⁾、速球では0.24ms、カーブでは2.46msであった。このことから、リリースの検出法の違いが Fig. 5 に示した速球とカーブの角速度波形の結果に影響を及ぼすものではないといえる。

本研究では、速球とカーブの投球運動の違いは、リリース前の前腕の回内外角度の違いだけであるという報告¹⁷⁾をもとに、速球とカーブの投球時の前腕の角速度を計測比較した。その結果、リリース時の角速度の大きさや最大角速度を迎えるタイミングの違いがあることから、上腕と前腕の間にねじれが生じる可能性があることを示唆した。しかし、これらの現象をより定量的にとらえるためには、前腕の運動と上腕の運動を完全に分離する必要がある。つまり、前腕に固定した座標

系で見た長軸まわりの角速度には、前腕の回内による角速度だけではなく、肩の内旋にともなう前腕長軸まわりの角速度が含まれている。このためには、同時に肘関節伸展や肩関節内旋運動を計測することが必要である。また、ねじれによる関節内の靱帯や腱に加わる負荷を詳細に見積もるためには、有限要素法などの数値計算法を用いる必要がある。

謝辞

本研究は平成10年度、筑波大学学内プロジェクト研究からの助成に基づくものである。本研究にご協力下さった浅黄樹彬氏に厚く御礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1 Atwater AE (1979): Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries. *Exerc Sports Sciences Rev* 7: 43-85.
- 2 Barrentine SW, Matsuo T, Escamilla RF, Fleisig GS, and Andrews JR (1998): Kinematic analysis of the wrist and forearm during baseball pitching. *J Appl Biomech* 14: 24-39.
- 3 Dillman CJ, Fleisig GS, and Andrews JR (1993): Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *J Orthop Sport Phys Therapy* 18: 402-408.
- 4 Elliott B, and Grove JR (1986): A three-dimensional cinematographic analysis of the fastball and curveball pitches in baseball. *Int J Sport Biomech* 2: 20-28.
- 5 Feltner M, and Dapena J (1986): Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. *Int J Sport Biomech* 2: 235-259.
- 6 Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, and Escamilla RF (1995): Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sport*

- Med 23: 233-239.
- 7) Fleisig GS, Escamilla RF, Andrews JR, Matsuo T, Satterwhite Y, and Barrentine SW (1996): Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing. *J Appl Biomech* 12: 207-224.
 - 8) Hang, Y (1983): A clinical and biomechanical study. *Biomechanics VIII-A*, Human Kinetic Pub. Inc., Illinois, 70-85, 1983.
 - 9) 服部恒明(1977): 回内運動, 回外運動の解剖学. *新体育* 47: 677-679.
 - 10) 平野裕一, 青木秀憲(1998): 投球速度漸増にともなう投球腕上肢および上肢帯筋の活動の変化. *体育科学* 26: 11-18.
 - 11) Jobe FW, Tibone JE, Perry J, and Moynes D (1983): An EMG analysis of the shoulder in throwing and pitching. A preliminary report. *Am J Sport Med* 11: 3-5.
 - 12) Jobe FW, Moynes DR, Tibone JE, and Perry J. (1984): An EMG analysis of the shoulder in pitching. A second report. *Am J Sport Med* 12: 218-220.
 - 13) 功力靖雄(1997): アマチュア野球教本Ⅱ防御のマニュアル. ベースボールマガジン社, 東京, pp. 14-17.
 - 14) 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦(1996): 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する3次元的研究. *体育学研究* 41: 23-37.
 - 15) 太田 憲, 小林 敏(1994): 加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測. 計測自動制御学会論文集 30: 1442-1448.
 - 16) Pappas AM, Zawacki RM, and Sullivan TJ (1985): Biomechanics of baseball pitching. A preliminary report. *Am J Sport Med* 13: 216-222.
 - 17) Sakurai S, Ikegami Y, Okamoto A, Yabe K, and Toyoshima S (1993): A three-dimensional cinematographic analysis of upper limb movement during fastball and curveball baseball pitches. *J Appl Biomech* 9: 47-65.
 - 18) Sisto DJ, Jobe FW, Moynes DR, and Antonelli DJ (1987): An electromyographic analysis of the elbow in pitching. *Am J Sport Med* 15: 260-263.
 - 19) Stevenson JM (1985): Finger release sequence for fastball and curveball pitches. *Can J Appl Sport Sci* 10: 21-25.
 - 20) Wang YT, Ford III HT, Ford Jr HT, and Shin DM (1995): Three dimensional kinematic analysis of baseball pitching in acceleration phase. *Percept Motor Skill* 80: 43-48.
 - 21) Werner SL, Fleisig GS, Dillman CJ, and Andrews JR (1993): Biomechanics of the elbow during baseball pitching. *J Orthop Sport Phys Therapy* 17: 274-278.