

## 感覚運動制御からみた投動作の理解

名古屋大学 山本 裕二  
(共同研究者) 大阪大学 門田 浩二  
同 木下 博  
山梨大学 木島 章文

### Effects of Sensorimotor Control on Throwing Movements

by

Yuji Yamamoto

*Research Center of Health, Physical Fitness and Sports,  
Nagoya University*

Hiroshi Kinoshita, Koji Kadota

*Graduate School of Medicine,  
Osaka University*

Akifumi Kijima

*Department of Education,  
University of Yamanashi*

#### ABSTRACT

We investigated the finger forces and kinematics during overarm throwing of balls with two different textures, from the perspective of the sensorimotor control of dexterous throwing. Five males threw two different balls, one with a smooth silk surface and the other with a sandpaper surface, at a target located 2.7 m away as accurately as possible. The force of the middle finger was measured using a three-dimensional force transducer at a frequency of 2 kHz. The kinematics were recorded

using eight motion-capture cameras at 500 Hz. Ball texture did not affect the ball velocity, range of wrist movement, or peak resultant force. However, the peak shear force and range of elbow movement were significantly smaller with the silk ball than the sandpaper ball. The resultant and shear forces had two peaks before the ball release. The first peak of the resultant force corresponded to the timing of maximal wrist dorsiflexion, 100 ms before the ball was released, suggesting that this force during the first half of the forward swing is the propulsive force that imparts the ball velocity. The second peak, 30 ms before the ball was released, roughly corresponded to the time when the hand passed the wrist in the direction of the throw, suggesting that this force contributed to the spin of the ball. In addition, the ball texture affected the shear force acting on the ball.

## 要 旨

「巧みな投げ」を実現する投動作について感覚運動制御の観点から、肌理の異なるボールを投球する際のリリース力とキネマティクスを検討した。5名の成人男性が、肌理の異なるシルクと紙やすりを貼付したボールを2.7m先の標的に正確に投げる課題を行った。その結果、肌理の違いは投射速度、手関節の可動範囲と垂直方向のリリース力に違いは認められなかった。しかしながら、シルクを貼付した際の水平方向のリリース力のピーク値と肘関節の可動範囲は紙やすりを貼付した場合よりも有意に小さかった。また、垂直方向のリリース力には、ピークが2つ見られ、最初のピークは手関節の最大背屈時と一致し、リリース直前のピークは投球方向に手が手首よりも前に出る時点とほぼ一致していた。これらのことから、肌理の違いにより投擲物に加える水平方向のリリース力に違いがあり、投動作の前半に加えられる力が、投擲物の推進力に、リリース直前に加えられる力が回転にかかわる力であることが示唆された。

## 緒 言

投動作は、200万年前の人類の祖先から発達してきた動作の一つで、原人の脳を進化させたと言われている<sup>1-3)</sup>。それは、正確に投げるという行為には、膨大な数の神経細胞が適切な順序とタイミングで興奮し、その興奮が数百万ものシナプスを介して伝達され、その刺激に応じて多数の細胞が反応するという非常に複雑なプロセスがかかわっているからである<sup>3)</sup>。また、投動作に伴う神経活動が、抽象的な思考能力の発達にまでつながったという主張もある<sup>4)</sup>。さらに、こうした投動作は、狩猟や逸脱者への攻撃に用いられることによって、他の動物のような近縁関係だけでなく、近縁関係を越えた協力関係 (kin-ship independent cooperation) を築いたと考えられ、社会性の発達にも影響を及ぼしたと考えられている<sup>1,2)</sup>。

投動作と同様、打動作 (clubbing) も人類の進化に重要であり、この精緻で強力な投・打動作のために手の解剖学的構造自体が進化してきたとされている<sup>5)</sup>。Griffiths<sup>6)</sup>は、けがをした人の運動機能に関する研究の中で、手の握りをボール握り (ball grip) と円柱握り (cylinder grip) に分類した。さらにNapier<sup>7)</sup>は、これをもとに、手の機能が

らボール握りを正確な握り (precision grip), また円柱握りを力を入れる握り (power grip) に分類し, 解剖学的にも機能的にも二種類の把持運動の違いを定義した. そしてこの正確な握りが投動作の握りに, 力強い握りが打動作の握りに相当するのである<sup>5)</sup>. 正確な握りの中でも, 小型の球状の投擲物の把持運動は, 三つあごチャック (three-jaw chuck) と呼ばれ<sup>8)</sup>, 親指, 人差し指, 中指の3点で投擲物を把持し, 投擲の速度と正確性を実現できる把持運動である.

このように, 投動作は人間の基本動作のひとつであり, その技術が競技力を決定する種目も多いため, 長い間スポーツ科学や運動学における主要な研究対象とされてきた<sup>9)</sup>. しかし, それらの先行研究を概観すると, ひとつの傾向が浮かび上がってくる. これまでの研究は, 身体の動作パターンを運動学的な視点から検討した報告が多い. また, 投擲距離や投擲速度の最大化が主たる興味の対象となっている. その一方で, 投動作の重要な目的である「思ったところに思った速さで投げる」という, 機能的な投げが実現されている制御の仕組みに迫った研究は意外にも多くない.

投げのパフォーマンスを決める投射速度や角度は, 最終的にリリース時に投擲物に作用する力の影響を強く受ける. つまり, 望み通りの投げを実現するには, リリース時に投擲物に作用する力の適切な制御が欠かせない. 言い換えれば, リリース前後におけるこの力の様相を知ること, 投げの制御の仕組みに迫ることができると考えられる.

Hore, Watts, Tweed, and MacDougall<sup>10)</sup> は, 中指の近位と遠位に力センサを貼り, 投球中の指に働く力を計測している. そして, 上肢の動きから伝えられる力と, リリース直前にみられる指の屈曲トルクによる力があることを示した. また, Kinoshita, Obata, Nasu, Kadota, and Matsuo<sup>11)</sup> は, 野球ボールに軽量の有線3軸力センサを埋め

込み, リリース時にボールに作用する力の計測を行っている. その結果, リリース時の力には, 投擲物の表面に垂直に作用し投射速度を決定する成分 (resultant force) と, 表面に水平に作用し投擲物の回転を生み出す成分 (shear force) が存在することを明らかにしている. この両者の相互作用がリリース動作の直接的な制御目標となっている可能性が示唆される.

ところで, 初期の投動作で用いられていたのは, 石器類である. 様々な形状の石器類が発見されているが, 肌理 (texture) の異なる石器類を正確に投げるという動作は, この投擲物の表面に作用する力を, その肌理, あるいは投擲物の表面の摩擦 (friction) に合わせて制御しなければならない. 物体を把持する力は肌理によって異なることが数多く報告されている. 一般に摩擦係数の逆数と把持力が比例する, すなわち摩擦が少ない場合には強く把持される<sup>12)</sup>. しかしながら, これらの研究の多くは物体を, 親指と人差し指でつまむ動作であり, 投動作中の投擲物に加わる力を肌理との関係で計測したものは見当たらない.

そこで本研究では, 投擲物へ働く力 (リリース力) と動作パターンの計測を行い, 投擲物表面の肌理の違いが, 投動作の制御にどのような影響を及ぼすかを検討する. そして「巧みな投げ」を実現している制御の仕組みを明らかにすることを目的とする.

## 1. 方法

### 1.1 実験参加者

実験参加者は, 右利きの男性8名であった. 大学時代までに野球あるいはソフトボールを部活動として経験した者が6名, 残りの2名は部活動での経験はなかった. いずれも大学生および大学院生であった.

## 1.2 課題

実験課題は、2.7メートル先の高さ1.2メートルに設定された、一辺4センチの正方形のターゲットに向かって、できるだけ正確に投げる的あて課題であった。

## 1.3 リリース力計測装置

ボールリリース時までにボールにかかる指の力を計測するために、小型力覚センサ（テック技販、USL06-H5-500N）をボールに埋め込んだ。ボールは、軟式野球の小学生用のC号と呼ばれる直径67.5～68.5mm、重さ130gを使用した。このボールに小型力覚センサを埋め込めるように穴をあけ、プレートを取り付け（図1A）、このプレートに、小型力覚センサを固定した（図1B）。

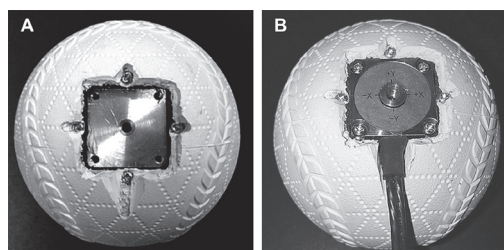


図1 ボールへのプレートの装着(A)と小型力覚センサの固定(B)

さらに、Z軸方向の力を計測するために、センサ中央部に別のプラスチック製のプレートをねじ止めし（図2A）、その上からテーピングテープでプレートを覆い、できるだけ接触面の凹凸がないようにした。同時にセンサから出ているケーブル

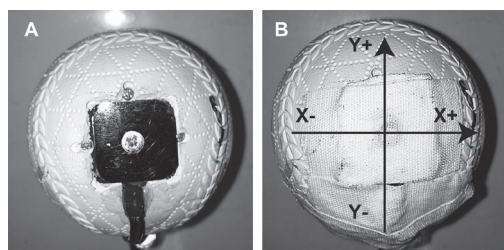


図2 Z軸方向の力計測法(A)と軸の定義(B)

ル部分も固定した（図2B）。

このようにボールに力覚センサを固定し、有線でアンプ（テック技販、DSA-03A）に接続し、リリース力を計測する装置を作成した。

## 1.4 実験条件

ボールの肌理である滑り具合を実験条件として、2種類を設定した。Silk条件（図3A）は、絹の生地をボールと指の接触面に貼付した。Sandpaper条件（図3B）は、320番の紙やすりをボールと指の接触面に貼付した。また、ボールにはそれぞれ4つの5mmの反射マーカを貼付し、ボールの位置及び回転が記録できるようにした。

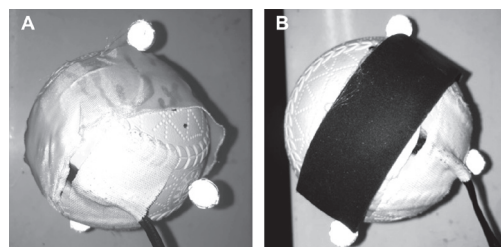


図3 Silk条件(A)とSandpaper条件(B)

## 1.5 手続

実験参加者の胸椎（T5）、胸骨剣状突起、頸椎（C7）、肩峰、両肘の外側・内側上顆、両手首の外側・内側茎状突起、中指中手骨骨頭の9か所に反射マーカを貼付し、ターゲットにも反射マーカを貼付した。実験参加者は、ターゲットから2.7m離れたところに置かれた椅子に座り、的あての練習を数回行った。実験参加者の動きは8台の光学式動作解析装置（OQUS300, Qualisys, Sweden）を用いて、500Hzで撮影された。投球方向をX軸の正、実験参加者の右肩から左肩に向けX軸に直行する方向をY軸の正、これらと直交し重力方向と逆の方向をZ軸の正とした。

また、力覚センサのデータは光学式動作解析装置と同期され、サンプリング周波数2kHzで、撮

影と同じ時間記録された。

実験参加者は、実験内容説明書に基づき、実験内容の説明を受けたのち、同意書に署名した。力覚センサ部分に、最後まで接触を続けるとされる中指<sup>10,13,14)</sup>を添えるよう指示され、残りの指は投球に支障ないように、各参加者の投げやすいようにボールを握るように指示された。いずれの条件でも実験参加者はボールを頭上に構え、投げ下ろすように投球を行った(図4)。投球開始は、1秒間の警告音の後、0.3秒ごとになるピープ音の3回目のピープ音に合わせて行うよう指示された。実験条件に慣れるため、数球の練習ののち、Silk条件とSandpaper条件は、参加者間でカウンターバランスを取り、最初に行う条件を決めた。各条件とも20球ずつ連続して投球を行った。

なおこの実験手続は、名古屋大学総合保健体育科学センターにおける体育系研究倫理審査の承認(28-26)を受けて実施された。

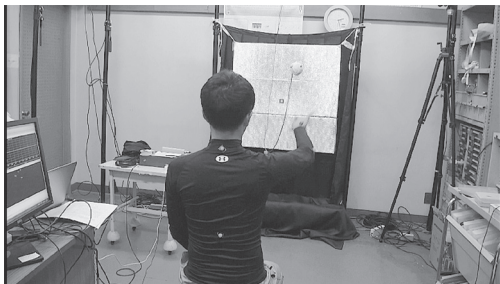


図4 実験風景

## 1.6 分析方法

パフォーマンスの指標として、ボールの初速度を分析した。ボールの初速度は、ボールに貼付した反射マーカーの位置座標をもとに、リリースから0.1秒後(50コマ分)までの平均速度を算出した。

リリース力とキネマティクスに関しては、リリース前0.2秒から、リリース後0.1秒までを分析対象とした。

この間の上肢の動きをスティックピクチャーで表したのが、図5AとBである。図の右端がリリース

に相当する。

まず、力覚センサのひずみ出力について、負荷のない状態でのオフセット値を計測した。そして実験で記録されたひずみ出力から補正後の荷重値(N)を求め、オフセット値で補正後、荷重値の時系列データを得た(図5C上段)。この荷重値の変化から垂直方向の荷重値の変化( $\Delta F_z$ )のピーク値を求め、時間に沿ってその荷重値の変化がゼロクロスする点(図5Cの縦の実線)をリリースと定義した。

ボール表面に水平方向に働く力は、 $F_x$ と $F_y$ の合力とし算出し、これを $F_h$ と表記する。そして、ボールの表面に垂直方向に働く力( $F_z$ )とを分析対象のリリース力とした。

またキネマティクスに関しては、座位での投動作課題であったため、上腕の手・肘関節の角度変化だけを分析対象とした。手関節角度は、手関節中心(手関節の両側に貼付したマーカーの中心)から中指手骨骨頭に貼付したマーカーに向かうベクトルと、手関節中心から肘関節中心(肘関節の両側に貼付したマーカーの中心)に向かうベクトルのなす角とした。同様に肘関節は、肘関節中心から手関節中心に向かうベクトルと、肘関節中心から肩峰に向かうベクトルのなす角とした。

そして投擲物に垂直に働く力( $F_z$ )と投擲物の表面に水平方向に働く力( $F_h$ )の関係を見るために、 $F_z$ のリリース直前のピークを基準に、 $F_h$ のピークとの時間差を求めた( $\Delta F_z-F_h$ )。

そして、リリース力とキネマティクスの関連を見るために、垂直方向に働く力 $F_z$ の一番目のピークを基準に、手関節角度の最小値、すなわち最大背屈位になった時点との時間差を求めた( $\Delta F_z-w$ )。また、リリース前の水平方向に働く力 $F_h$ のピークを基準に、手の位置が投球方向に対して手首を追い越す時点との時間差を求めた( $\Delta F_h-wh$ )。

なお、マーカーの記録不具合等によって、今回



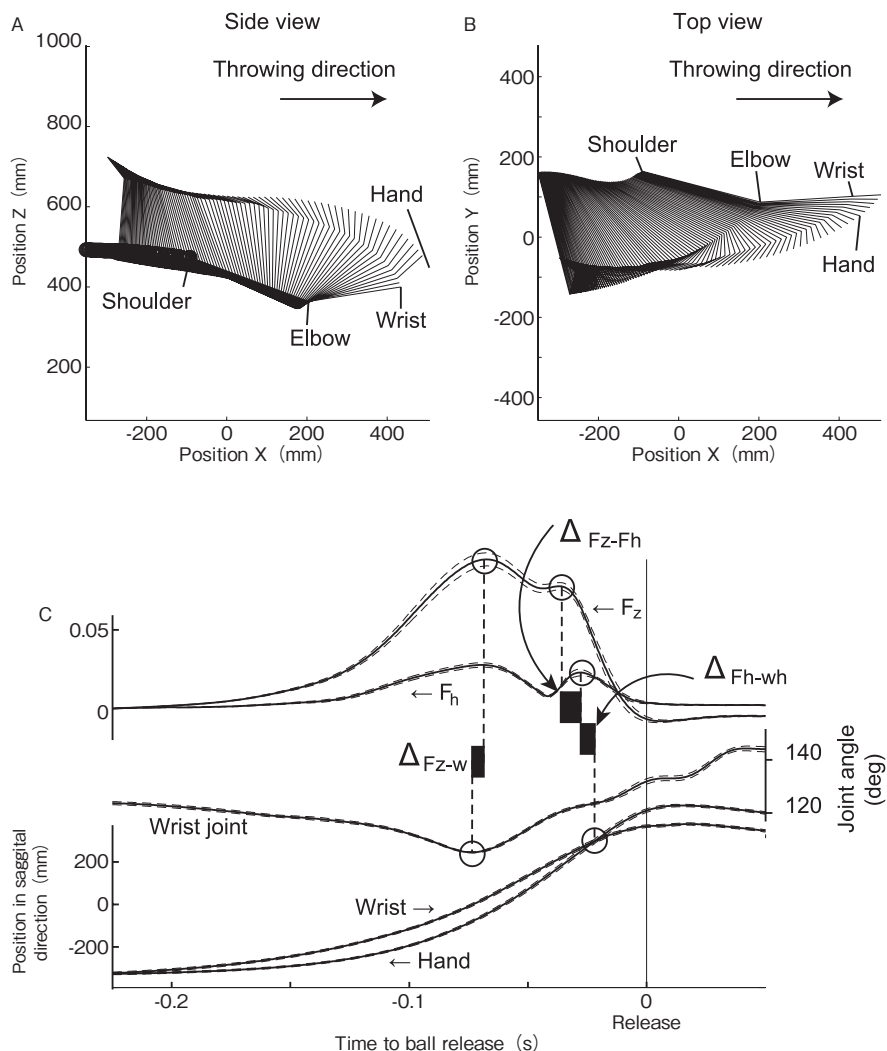


図5 投動作のスティックピクチャー (A: 側面, B: 上面) と従属変数としての時間差の定義

分析対象となったのは8名中5名であり、野球あるいはソフトボール経験者が3名と未経験者が2名であった。

2群の群間比較の統計的検定には、乱順化検定<sup>15,16)</sup>を用い、有意水準を5%とした。

## 2. 結果および考察

### 2.1 ボール初速度

ボール初速度を実験参加者ごとにまとめたものが表1である。乱順化検定の結果、両条件には有意な差は認められなかった ( $p = 0.595$ )。つまり、投擲物の肌理によって、投射されたボールの

表1 ボール初速度 ( $ms^{-1}$ )

Participant	Sandpaper		Silk	
	Mean	SD	Mean	SD
A	10.0	1.11	10.5	0.51
B	10.9	0.57	10.2	0.57
C	8.5	0.32	8.9	0.22
D	12.7	0.39	12.5	1.15
E	9.5	0.55	8.5	0.66

速度には違いがなく、同程度のパフォーマンスを発揮していたといえる。

### 2.2 リリースカとキネマティクス

5名の実験参加者の垂直方向、水平方向のリ

リリース力と、手関節・肘関節の角度変位、手と手首の投球方向 (X) の位置変位の平均 ± 標準誤差の時系列を、条件別に示したのが図 6 である。垂直方向、水平方向とも二峰性のピークを持つ場合が多く、一つ目のピークはリリース前の 100ms 以内に、二番目のピークはリリース前の 30ms 以内に見られた。

手関節は一度背屈位を経て伸展され、肘関節は伸展動作のみ見られた。また、手の投球方向の位置は、リリース前に手首よりも先行し、リリース時には手の方が手首よりも先行していた。

この結果は、先行研究の結果<sup>10, 11)</sup>とも一致するもので、前半のピークが上肢の運動によるもので、リリース前のピークが手あるいは指による力であると考えられる。

ただし、先行研究<sup>11)</sup>では、二番目のピークはリリース前 8 ms に出現している。これはボール速度が平均で  $32.5 \text{ ms}^{-1}$  と、本実験の約 3 倍の速度であることから考えると、本実験での動作速度が遅く、ピークの出現時期も相対的に先行研究の結果よりも早かったものと考えられる。

各実験参加者のリリース 0.2 秒前からリリースまでの垂直方向・水平方向のリリース力の力積とピーク値、手関節・肘関節の可動範囲について示したのが、図 7 である。乱順化検定の結果、水平方向のリリース力のピーク値と肘関節の可動範囲に有意な差が認められた。水平方向のピーク値は、Silk 条件の方が有意に小さかった (Sandpaper 条件: 4.9 N, Silk 条件: 2.6 N,  $p=0.023$ )。肘関節は、Silk 条件の方が可動範囲が

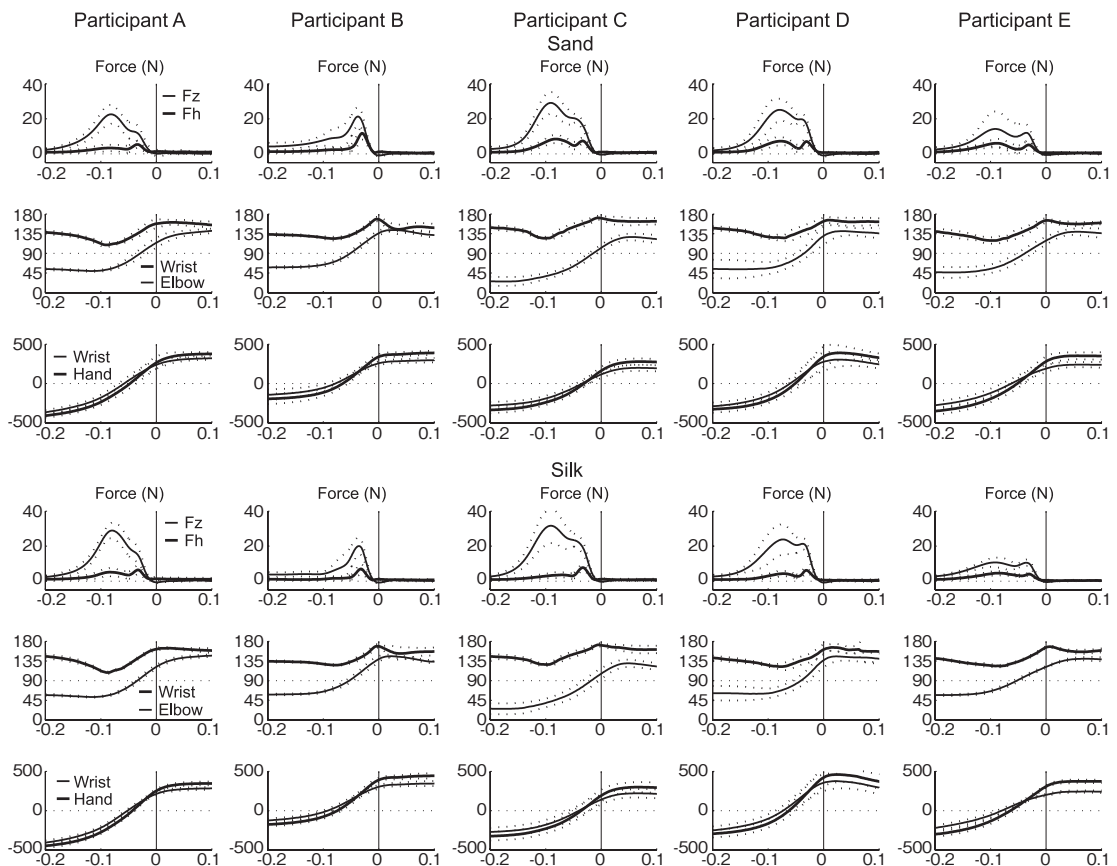


図 6 各実験参加者のリリース力(Fz, Fh), 関節角度(手・肘関節), 投球方向の位置(手, 手首)の平均時系列

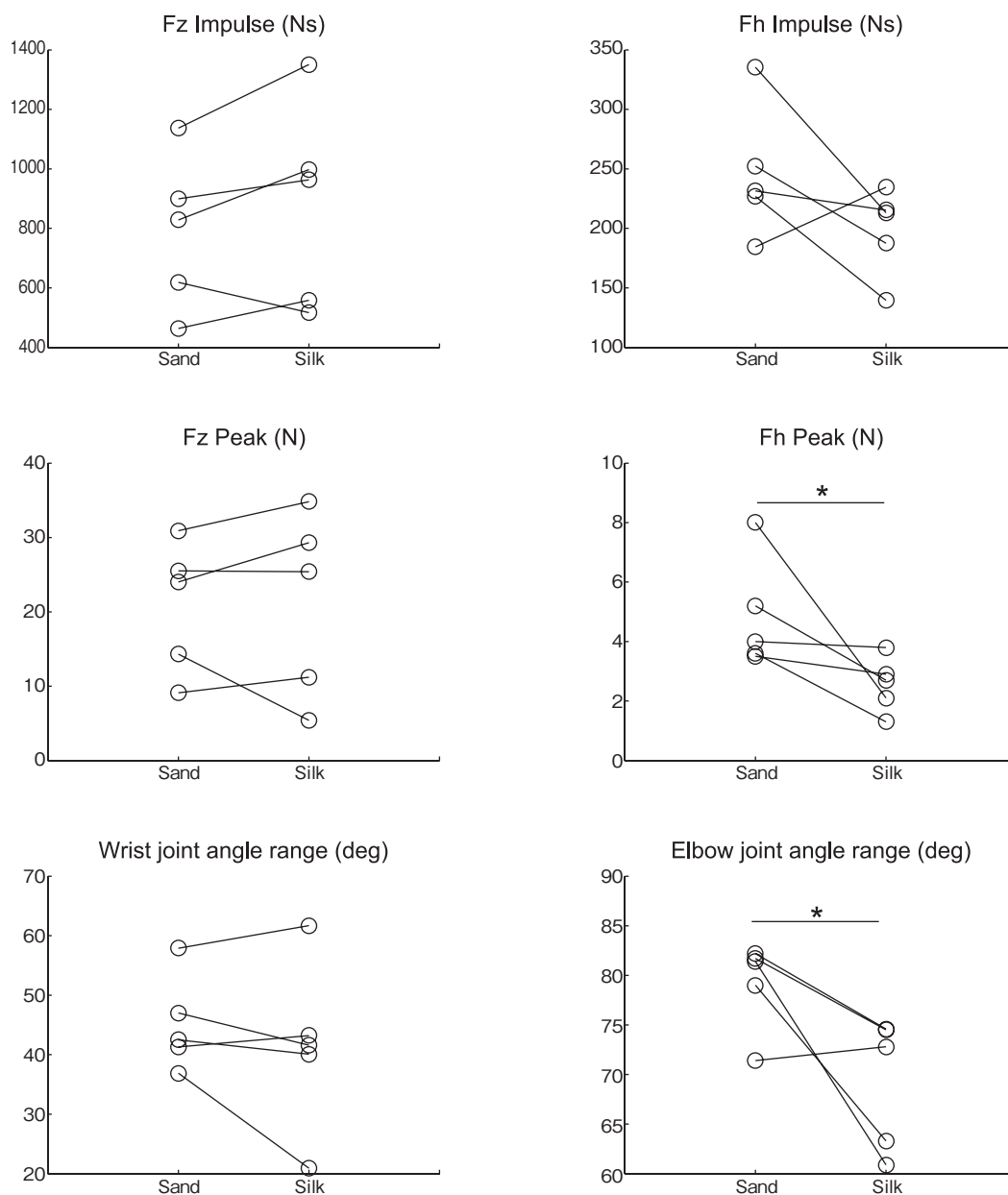


図7 各条件における各実験参加者のリリース力の力積, ピーク値, 関節可動範囲

狭かった (Sandpaper 条件: 79.1 deg, Silk 条件: 69.2 deg,  $p=0.032$ ). つまり, 投擲物表面の肌理が細かくなり, 摩擦が小さくなることによって, 前腕の動きが小さくなるとともに, 投擲物の表面に水平方向に加わる力が小さくなることを示唆している.

### 2.3 リリース力とキネマティクスの時間的關係

図 8A にリリース前の Fz のピークに対する Fh のピークとの時間差 ( $\Delta Fz - Fh$ ), 図 8B にリリース前の Fz のピークに対して手の位置が手首の位置よりも投球方向に出た時点との時間差 ( $\Delta Fh - wh$ ), 図 8C に前半の Fz のピークに対する手関



節最大背屈時との時間差 ( $\Delta Fz - w$ ) の、それぞれのヒストグラムを示した。

まず、リリース前の  $Fz$  のピークを基準に、 $Fh$  のピークの出現時点を見ると、 $Fh$  のピークの方がリリースに近い。その時間遅れはほぼ 15ms 以内であったが、 $Fh$  が  $Fz$  に先行した例はほとんどなかった。つまり、リリース前に投擲物への垂直方向の力を加えたのち、最終的には水平方向の力が加わっていたことがうかがえる。この力は、投擲物表面に平行に作用する力で、主に投擲物の回転にかかわる力と考えられる<sup>11)</sup>。今回の実験では中指をセンサ部に乗せたので、リリース前の 20 ~ 30ms のところで、中指が投擲物から離れる直前に加えている力と考えられる。

また、このリリース前の  $Fz$  のピークを基準に、手と手首の位置関係から、手の方が手首よりも投球方向に出た時点を見ると、ここでも  $Fz$  のピークの直後 30ms 以内が多くなっていた。このことは、リリース前に手あるいは、指が発揮する投擲物に垂直方向に加える力はほとんどないことを示唆している。

逆に、投動作前半に見られた  $Fz$  のピークは、手関節の最大背屈時点とほぼ同じであった。つまり、投擲物に垂直方向に加える力が最大になる時点では、肘が投球方向に先行し、投擲物を持つ手が後方に置かれている状態、いわゆるムチがしなった状態であると考えられる。

しかしながら、これらのリリース力とキネマティクスとの間の時間的關係については、投擲物の肌理による違いは認められなかった。これは、今回の実験では、結果的に正確性を重視し、投擲物の初速度に肌理による違いがみられなかったことが一つの原因であると考えられる。

### 3. まとめ

本研究では、感覚運動制御の観点から投動作を理解するために、肌理の異なる投擲物の投動作を

観察した。具体的には、絹と紙やすりという肌理の異なる 2 種類の投擲物を用いて、投動作中に発揮される中指が投擲物の垂直方向に働く力と表面の水平方向に働く力を計測した。さらに、投動作中の上肢の動きを記録した。その結果、ボール初速度、垂直方向に働く力のピーク値と力積、手関節可動範囲には肌理による違いは認められなかったが、水平方向に働く力のピーク値と、肘関節の可動範囲に差が認められた。つまり、肌理が細かく、摩擦が少ない投擲物の方が、水平方向に働く力のピーク値が小さく、肘関節の可動範囲が小さかった。

また、投擲物に垂直に働く力は二峰性を示し、最初のピークはリリース前の 100ms 以内に見られ、手関節の最大背屈時とほぼ一致していた。リリース前の二番目のピークはリリース前の 30ms 以内に見られ、投擲物の水平方向に働く力のピークに先行しており、これは手が、手首よりも投球方向に先行する時点とも一致していた。したがって、これらの力発揮パターンは、投擲物を前方へ推進するために働く力と、投擲物に回転を与える力に対応するものと考えられた。

これらのことから、投動作においては、リリース前のわずか 30ms 以内まで、投擲物の肌理に応じた運動制御が行われ、「巧みな投げ」を実現していることが示唆された。ただ、この時間は投射距離にも依存し、投射速度によりさらに短いことが考えられる。今回の研究では、有線での計測であったため、このことが課題の制約となった。今後は無線での計測を可能にすることで、より多様な投動作における感覚運動制御の解明が期待される。

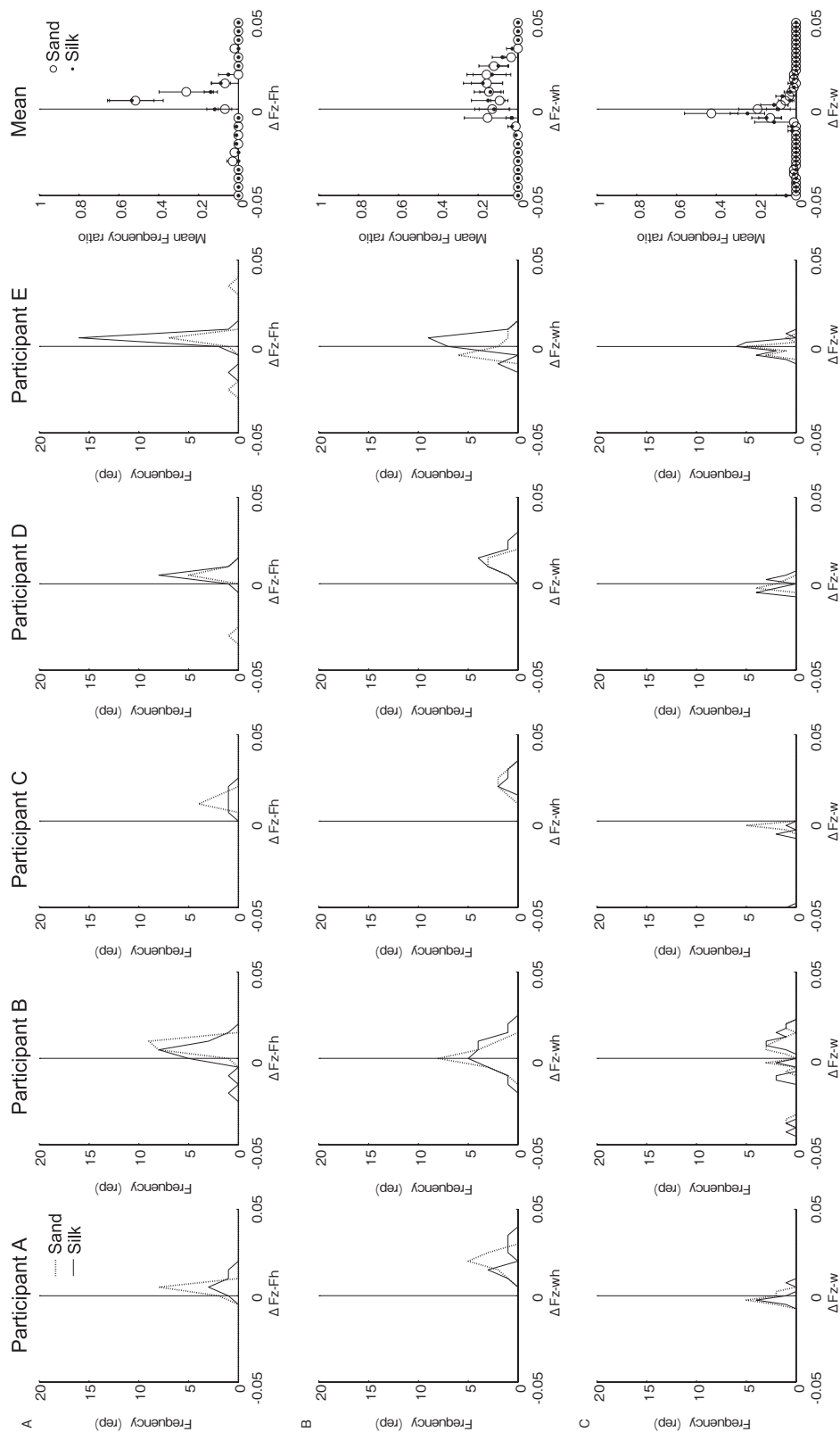


図8 投射前のFzのピークに対するFhのピーク時(上段), 投射前のFzのピークに対して手の位置が手首の位置よりも  
 投球方向に出た時点(中段), 前半のFzのピークに対する手関節最大背屈時(下段)のヒストグラム

## 謝 辞

本研究に対し助成を受け賜りました，公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申し上げます。また，実験遂行ならびに解析に多大なる協力をいただいた名古屋大学の横山慶子氏，ボールへの力覚センサ取り付けのための加工を行っていただいた澤木弘二氏にお礼を申し上げます。

## 文 献

- 1) Bingham P.M., Human uniqueness: a general theory. *The Quarterly Review of Biology*, **74**, 133-169 (1999)
- 2) Bingham P.M., Human evolution and human history: a complete theory. *Evolutionary Anthropology*, **9**, 248-257 (2001)
- 3) Calvin W. H. Did throwing stones shape hominid brain evolution? *Ethology and Sociobiology*, **3**, 115-124 (1982)
- 4) Crosby A.W., Throwing fire: projectile technology through history. New York: Cambridge University Press. (小沢 千重子 訳 (2006). 『飛び道具の人類史—火を投げるサルが宇宙を飛ぶまで—』. 東京: 紀伊國屋書店.) (2002)
- 5) Young R.W., Evolution of the human hand: the role of throwing and clubbing. *Journal of Anatomy*, **202**, 165-174 (2003)
- 6) Griffiths H.E., Treatment of the injured workman. *Lancet*, **241**, 729-733 (1943)
- 7) Napier J.R., The prehensile movements of the human hand. *Journal of Bone and Joint Surgery*, **38B**, 902-913 (1965)
- 8) Marzke M.W., Joint functions and grips of the Australopithecus afrensensis hand, with special reference to the region of the capitate. *Journal of Human Evolution*, **12**, 197-211 (1983)
- 9) 桜井 伸三 (編), 『投げる科学』. 東京: 大修館書店 (1991)
- 10) Hore J., Watts S., Tweed D., MacDougall A., Control of finger grip forces in overarm throws made by skilled throwers. *Journal of Neurophysiology*, **86**, 2678-2689 (2001)
- 11) Kinoshita H., Obata S., Nasu D., Kadota K., Matsuo T., Finger force during baseball pitching. *Proceedings of International Society of Biomechanics in Sports*, 126-129 (2014)
- 12) Cadoret G., Smith A.M., Friction, not texture, dictates grip forces used during object manipulation. *Journal of Neurophysiology*, **75**, 1963-1969 (1996)
- 13) Hore J., Watts S., Tweed D., Errors in the control of joint rotations associated with inaccuracies in overarm throws. *Journal of Neurophysiology*, **75**, 1013-1025 (1996)
- 14) Hore J., Watts S., Tweed D., Prediction and compensation by an internal model for back forces during finger opening in an overarm throw. *Journal of Neurophysiology*, **82**, 1187-1197 (1999)
- 15) Edgington E.S., Randomization test: third edition, revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc (1995)
- 16) 橘 敏明『確率化テストの方法—誤用しない統計的検定』. 東京: 日本文化科学社 (1997)