様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

# 科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月　 ８ 日現在

機関番号：１４４０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2014～2015
課題番号：２６５６０３５０

研究課題名（和文）動作依存力の巧みな利用：ボールリリース時の指とボールの運動特性の関係から

研究課題名（英文）Dexterous utilization of motion-dependent force: from the viewpoint of the relationship between fingers and ball movement

研究代表者
松尾　知之（Matsuo, Tomoyuki）

大阪大学・医学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：００２０９５０３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,900,000円

研究成果の概要（和文）：小型・軽量の力覚センサーを埋め込んだセンサーボールを開発し、投球中の指とボール間に働く力の特性を明らかにすることを目的とした。ボール法線方向に働く第2指および第3指の最大値は、肩関節最大外旋位時付近で50～100 Nを示した。また、ボールリリース10 ms前には第2峰を示すものもいた。この第2峰は、指の近位方向に働く力のピークやボールが手掌内を転がり始める時刻と一致していた。このわずか10 msの間にボールの転がり具合を調整することでボールの投射方向、速度、回転を調整していることが示唆された。また、発揮力のスパート時刻、最大値、指間の発揮力の差には個人差があることも明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：The purposes of this study were to develop the ball equipped force-sensor with wireless transmitter, and to illustrate characteristics of force exerted between fingers and the ball during baseball pitching. The maximal normal force exerted by the 2nd or 3rd fingers ranged from 50 N to 100 N at the moment of the maximum shoulder internal rotation. Some showed the 2nd peak of the normal force at 10 ms before the instant of ball release. Time of the 2nd peak synchronized with the peak force in the tangential direction of the ball and the proximal direction of the finger. They also synchronized with the onset of ball rolling within the hand. It was suggested that pitchers controlled the project angle, velocity, and rotation of the ball by fine-tuning the condition of ball rolling during this short period until ball release. It also illustrated that there are individual differences in the onset-time of force, peak values, and the difference of force between the 2nd and 3rd fingers.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：運動制御　投球　力覚センサー　無線

**１．研究開始当初の背景**

目標に向かって投擲物を速く正確に投げるためには，極めて精緻な運動制御が要求される．リリース時の投擲物の角度が１度ずれると，20m 先では 30cm 以上のずれとなり，それでも 1/1000 秒以下の時間精度で投擲物をリリースする必要がある(Alexander, 1991; Calvin,1983).

投擲物を速く投げることに関する研究は，運動連鎖などの動作の順序性(Fleisig, et al., 2009; Stodden, et al., 2001)や運動依存力の有効活用(Feltner, et al., 1989; Hirashima, et al., 2007), あるいは投球速度と関連の深い運動学的変数 (Matsuo, et al.,2001)などが既に報告されている.

一方，投球の正確性に関する研究は極めて限定され，今のところ，Hore らのグループが精力的に活動している(Hore, et al., 1996, 1999, 2001, 2005, 2011)．彼らは,一連の研究で，手や腕の軌道（位置制御）よりも指の開くタイミング（時間制御）によって，結果の正確性が決まること(Hore, et al., 1996)，そして握ったボールを開放する際には，手を開き始めることでボールを指先まで転がす相と動作依存によってボールが指を後方に押す力を利用して指を開く相の２つがあることを明らかにしている(Hore, et al., 2005, 2011).

しかしながら，これらの研究では，ボールと指の最終接触点である指先に圧力センサーを貼付した状態で投球しており，野球の投手などが指先の感覚を重要視することを考慮すると，リリース直前の最も重要と思われる情報の一部を捉えきれていない可能性は否定できない.

**２．研究の目的**

本研究では，指先に圧力センサーを付けることを排除し，ボールに小型 3 軸力覚センサーを埋め込んだセンサーボールを開発し，指によってボールに加えられる力の特性を、投球動作との関連付けの中で明らかにすることを目的とした。

**３．研究の方法**

**（１）センサーボールの開発**

小型 3 軸力覚センサーを埋め込んだセンサーボールを作成するにあたって、ボールは中にコルクが詰まっているサインボール（ミズノ社製, 2ZO-120）を使用した。通常の硬式野球の公式球は、2 種類のゴム材で包まれたコルク球が芯の部分にあり、それを毛糸と木綿糸で巻き付け、その上に牛革を貼り付けているために、圧力センサーを固定したり、基板部分を中に埋め込むには不安定であった。また、表面に近い毛糸の部分を大きく削ることになるために、球の形状を保つことが難しいという点もコルク式のサインボールを使用する理由の一つとなった。

圧力センサー（テック技販社製、S06－H5-500N、定格容量：500N(Z 軸)、サンプリング周波数：1,000Hz）をアルミ板に固定し、そのアルミ板を、加工したボールに固定した。以下の図は、その模式図と製作過程の写真である。

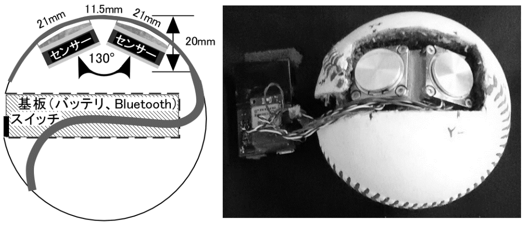


図1. センサーボールの模式図（左）と製作過程の写真(右). ボール内にある丸い金属部分がセンサー. センサー上に表面を丸く加工した木材を乗せ、その上に牛革を貼り付けることで、投球時の違和感をなくす. また、写真内の左にある基板をボールの中に挿入する.

センサーを埋め込んだ後、センサーの上に表面をボールと同様の円弧になるように丸く加工した木材を貼り付け、その上に切り取った牛革を、再度、貼り付けた。基板部分に関しては、スイッチとバッテリーの充電用のマイクロ USB 端子があるために、20mm×30mm の大きさで開口したままであった。この開口部はどの指にも触れない部分であったことから、投球には支障はなかった。

基板部分には Bluetooth 無線が組み込まれており、リアルタイムで手元のコンピュータに 2 つのセンサーの 3 軸の圧力値が転送される。

**（２）センサーボールを使った投球実験**

対象は、大学硬式野球部に所属する投手 7 名（身長：1.70 ± 0.05 m、体重：69.3 ± 7.5 kg、年齢：21.1 ± 0.7 才）であった。

研究参加者は、口頭および文書にて実験内容の説明を受け、内諾書に署名を行った後、満足できるまで準備運動（投球練習を含む）を行った。最大努力で投球する準備が整った後、最大努力で硬式野球ボールでの投球を 5 球実施した。投球は、室内で行われ、4 m 先の高さ 1.5 m の位置に十字の目標を目掛けて行われた。

その後、体幹部（胸骨柄縁、胸骨剣結合部、両肩峰、第七頸椎、第八胸椎）、投球腕側の上腕外側上顆、尺骨茎状突起、第五中手骨骨頭およびボールに半径 7 mm の反射マーカーを貼付した。

マーカー貼付後、再度、十分な投球練習を行い、先に最大努力で投球した 5 球のうち高い速度を示した 3 球の平均値の 80%、85%、90%、全力の速度の 4 つの条件について（以下、それぞれ、slow，medium，fast，max 条件とする）、順に、速度調整のための数球の練習を行った後にセンサーボールを用いた計測のための投球を 5 球ずつ行った。この際の投球動作を光学式三次元動作解析システム（ProReflex4 台，240 Hz，Qualisys 社製）で撮影した。

速度条件毎に 5 球ずつ投じた中で、規定した速度よりも±5 km/h 外れた投球や、無線の

不調で力センサーのデータがうまく収集できなかった場合を除く、２～５球を平均し、代表値とした。

（３）指の動きとボールの回転の計測

対象は、社会人野球選手８名（身長：1.77 ± 0.05m、体重：74.6 ± 3.5 kg、年齢：24.2 ± 2.3 才）であった。

研究参加者は、あらかじめ配布済みの研究説明資料に目を通し、当日、実験担当者から口頭で実験内容の説明を受け、内諾書に署名を行った。満足できるまで準備運動（投球練習）を行い、反射マーカーを身体 49 ヵ所に反射マーカー（手指部には半径 3 mm、その他の部位には半径 7 mm）を貼付するとともにボール 4 ヶ所に半径 3 mm の反射マーカーを貼付した。貼付後、室内マウンドからの投球練習を行った。

投球練習後、約 20 m 先の捕手の位置に設置した同心円状の的の中心を目掛けて全力投球 5 球を行った。このときの投球動作を、光学式三次元動作解析システム（MX カメラ 16 台、1000 Hz、VICON 社製）で撮影した。

## ４．研究成果

野球のボールに力センサーを埋め込んだセンサーボールを開発し、実際の投球中にリリース時にボールに加えられている力を Bluetooth 無線を利用して計測することに成功した。

以下は、その計測によって得られた結果である。

（１）実験参加者の共通の特徴

肩関節最大外旋位時にボールの法線方向への力が最も大きくなるということが、いずれの投球条件においても被験者共通の特徴として挙げられた（図 2：Indx_z、Mdl_z)。第 2 指または第 3 指の最大値は、73.3±25.8 N、両指の合計では、132±42.0 N となった。

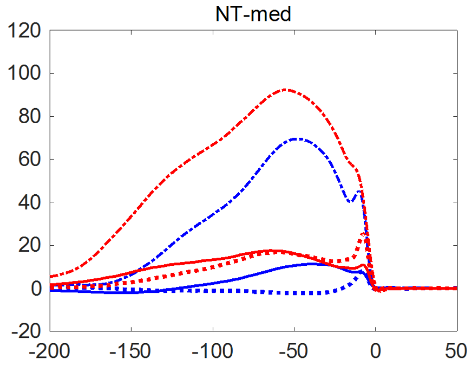


図２．Medium(85%max)条件での投球時の力の一例。横軸の０はボールリリース時。青線は第２指、赤線は第３指による力。実線は、X方向（指の長軸に垂直な方向で、ボール表面の接線方向。正は外側方向。点線は、Y方向（ボール表面の接線方向で、指の長軸近位方向）。鎖線はZ方向（ボールの法線と平行で、中心方向が正）。Indx：第2指。Mdl：第3指。

図 2 の第 2 指 Z 軸方向の力に見られる、リリース直前に生じる小さなピークの出現には個人差があり、両指に現れるものもいれば、図 2 のように片側(第 2 指)のみに現れるもの、あるいは両指ともに出現しないものもいた。本研究では、第 3 指のみに出現するものはいなかった。

この Z 軸の第 2 ピークは、第 2 指と第 3 指に生じるボールリリース直前（それぞれ-10.0 ± 2.1 ms、-11.2 ± 4.7 ms）の Y 軸正方向のピークとほぼ同期する。この Y 軸正方向の急激な力発揮は、すべての被験者のすべての速度条件にも見られる特徴であった。第 2 指または第 3 指の最大値で、25.6 ± 5.0 N、両指の合計では 34.2 ± 6.4 N であった。

（２）力発揮に見られる個人差

最も特徴的な個人差は、Z 軸方向の力発揮に見られた。つまり、力発揮のスパート時間、最大値、第 2 指と第 3 指の差に大きな個人差が認められた。

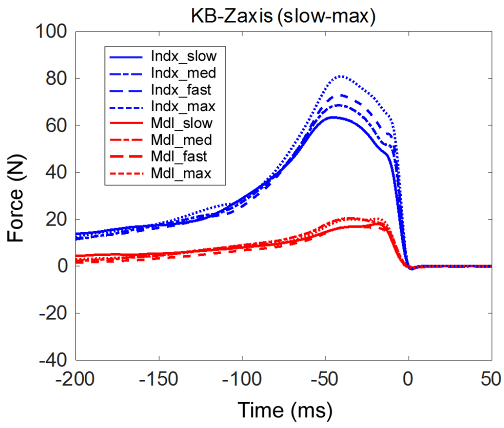


図３．第3指のZ軸方向の力(Mdl_slow～Mdl_max)が第2指のZ軸方向の力(Indx_slow～Indx_max)の1/5しか発揮できなかった参加者。横軸の０はボールリリース時。青線は第２指(Indx)、赤線は第３指(Mdl)による力。slow:80%max、med:85%max、fast:90%、max:100%max。

図 2 の第 3 指 Z 軸の値(Mdl_z)を見ると、ボールリリース 180 ms 前から力が増加し始めるが、図 3 の参加者では 100 ms 前までは緩やかに上昇し、それ以降に急激な上昇が見られている。

Z 軸方向の最大力に関しても、両者はほぼ同程度の投球速度であるが、図 2 の参加者で約 90 N を示しているが、図 3 の参加者の同条件では約 70 N に留まっている。

そして、図 2 の実験参加者は、第 3 指の方が第 2 指に比べて大きな値を示しているが、図 3 の参加者では第 3 指の発揮力が第 2 指のそれの 1/5 しか発揮していなかった。この結果は、この参加者の指の「まめ」のでき方が、いつも第 2 指にだけでき、第 3 指にはできたことがないという事実と一致するものであった。

他にも、図 3 のように、速度増加に伴い、第 2 指のピークは増加するが、第 3 指ではほとんど変化がないパターンやその逆のパターン、あるいはそちらにも相関関係がないパターンなどの個人差が見られた。

このように、Z 軸の両指の Z 軸方向への力

発揮の仕方は、投手の癖ともいえる特徴を反映しているものと考えられる。

また、X 軸方向の力も個人差が大きく、第 2 指、第 3 指ともに正の力を発揮するものもいれば、負を示すものもいた。Z 軸と比べて計測された力は著しく低く、Y 軸と比べても、同程度あるいは低い値を示していることから、速度には大きな影響を可能性は低いと考えられる。しかし、ボールの回転に影響を与える可能性は高い。

指先は、ボールへの最終効果器であることを考えると、両指の力の発揮具合を正確にフィードバックすることによって、指先感覚とボールの動態（速度や回転）との関係を詳細に把握することが可能となり、競技力向上へ繋がることが期待できる。

（3）速度条件と力の関係

第 2 指および第 3 指のボールリリース直前の Y 軸方向のピーク値とこの時刻の Z 軸の値、Z 軸方向の肩関節最大外旋位時付近の最大値を従属変数とし、速度条件を独立変数とした分散分析を行った結果、第 2 指の Y 軸ピーク時の Z 軸の値にのみ、速度条件の主効果が認められた（$p < 0.05$）（図 4）。

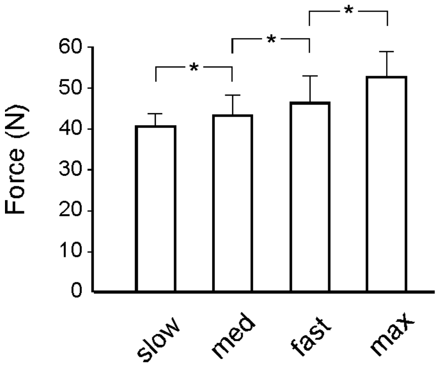


図４．第２指のY軸ピーク時のZ軸の力。図内では、混雑を避けるために隣通しの条件間のみに＊印(p<0.05)を付けているが、すべての条件間に有意差がある。

速度を上げるためには、ボールにより大きな力を加えることが必要になり、この変数は、ボールリリース直前の最終的な加速に必要な力と考えられることから、当然の結果と思えるが、上記の結果は、第 3 指よりも第 2 指の方がその役割を果たしている可能性が高いことを示唆する。しかし、一方で、各参加者の速度間の対応関係を解き、全研究参加者を含めた相関分析を行うと、この変数と速度間の相関関係は有意とはならなかった。この原因に関しては、力センサーへの指の置き方の違いや X 軸方向や Y 軸方向の力との関係など、今後さらに研究を進める必要がある。

第 2 指と第 3 指のそれぞれの Y 軸のピーク値に速度条件が与える影響は有意ではなかったが、第 2 指と第 3 指の合計値には有意差が認められた（図 5）。

投球速度とボールの回転数には有意な相関関係があることが知られており（Nagami, et al., 2013）、ボールの回転を決定する主成分であるこの Y 軸方向の力が投球速度にも影響を与えていると考えられるが、1 指単独ではなく、第 2 指と第 3 指が相互補完し合いながら、一定の力を発揮している可能性があることが示唆された。

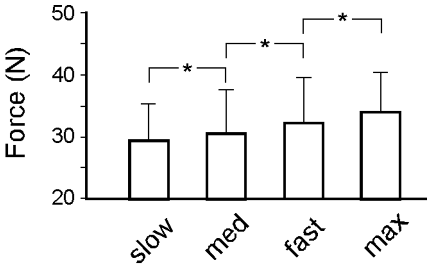


図５．第２指と第３指のY軸合力のピーク値。図内では、混雑を避けるために隣通しの条件間のみに＊印(p<0.05)を付けているが、すべての条件間に有意差がある。

（4）手掌でのボールの回転

投球中、ボールは手掌を転がり、そして指先からリリースされる。この手掌での転がり始めは、リリース直前の Y 軸のピークが生じる時点とほぼ一致する。

つまり、親指がボールから離れ、ボールが転がりだす瞬間には、指でボールを押さえる力と転がりだすボールに対して摩擦により回転力を与える力が発生していた（図 6）。

その後、ボールが受ける力は急激に減衰していき、逆にボールの回転速度は増加しながらボールリリースを迎える（図 7）。このときのボールの回転数は、−8,810 ± 1,790°/s であった。

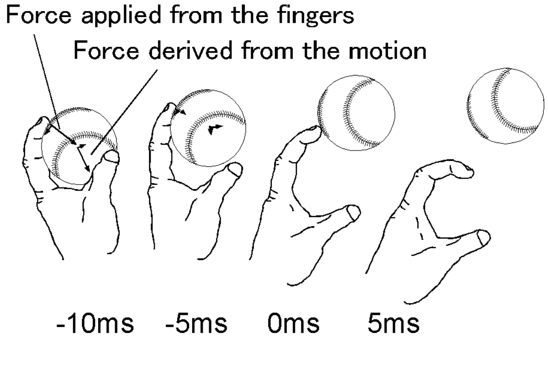


図６．ボールリリース時の力ベクトルの模式図。ボールリリース（time=0）の約10ms前に、指に保持されたボールは、身体から生み出された力により求心力が働くとともに、把持された指によりボールの法線方向および指の近位方向に力が加えられる。その際にタイミングよく第1指が離れ、ボールは指先方向に転がりだす。

以上の結果から、指からボールへ加えられる力には、体幹や上肢などの運動由来の相と指がボールを加速あるいは回転させる相の 2 つの相があると考えられる。前者の相の中には、運動依存の加速度の中でボールを保持す

るために最低限必要な力とそれに加えて余剰な力発揮の２つがあり、この余剰な力発揮に大きな個人差があることが示唆された。
もう一方の相は、ボールリリース直前の相でボールが転がり始める時点からボールリリースまでの極短時間の相である。ここでは、主に投球を加速するための力に加えて、回転方向に作用する力も加えられるが、加速のための力が減衰していくものと、再増加させられるものとがいることが明らかとなった。

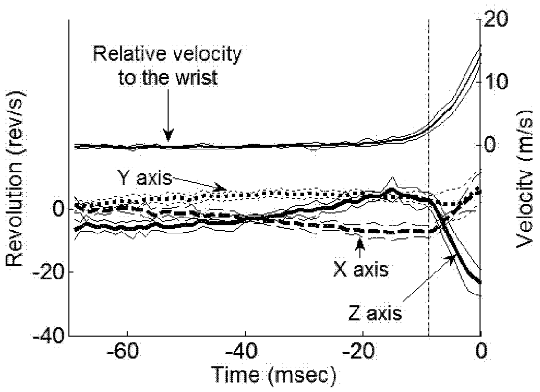


図７．ボールの手首からの相対速度（右縦軸）とボールの回転（左縦軸）。X, Y, Zの各軸は、それぞれ、手掌の長軸方向、甲から手掌方向、尺側から橈側方向。

**５．主な発表論文等**
**（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）**

〔雑誌論文〕（計　　件）

〔学会発表〕（計１件）
① 松尾 知之 他、ボールリリース時のボールと手指の動き、日本体育学会第 66 回大会、国士館大学（東京都世田谷区）、2015.

〔図書〕（計　　件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

**６．研究組織**
(1)研究代表者
松尾　知之（Matsuo, Tomoyuki）
大阪大学・大学院医学系研究科・准教授
研究者番号：00209503

(2)研究分担者
木下　博（Kinoshita, Hiroshi）
大阪大学・大学院医学系研究科・教授
研究者番号：60161535

(3)連携研究者
（　　）

研究者番号：