

映像を用いた3次元動作分析における適切な分析周波数の検討： 投運動を対象とした事例的検証

加藤 忠彦*

Influence of analysis frequency on video-based 3-D motion analysis: a case study in the shot-put motion.

Tadahiko KATO

Abstract:

This study aimed to investigate the influence of the analysis frequency on video-based 3-D motion analysis in the case of the shot-put motion. The data were collected at athletics competition, and the images of 20 male shot putters were captured at 300 fps using two high-speed video cameras. The 3-D coordinate values obtained by the 3-D DLT method were transformed into analysis frequencies of 60, 75, 100, 150, and 300 Hz, and various variables were compared. The results showed that the initial velocity, throwing angle, and throwing position of the shot were not affected by the analysis frequency, and that an analysis frequency of about 60 Hz was valid to calculate these variables. On the other hand, the values of acceleration of the shot varied depending on the analysis frequency, especially the maximum values at 150 and 300 Hz were significantly higher than those at 60-100 Hz. This suggests that a higher analysis frequency is necessary to calculate variables that require multiple numerical differentiations and calculations using coefficients such as external forces. And it was suggested that a higher sampling rate and analysis frequency would be desirable to elucidate the detailed mechanism for the sports motion.

Keywords : 3-Dimensional direct linear transformation method, Kinematics, Kinetics

要旨:

本研究では、映像からスポーツ動作中の3次元座標値を取得する際に、その分析周波数がどのような影響を及ぼすかを陸上競技の砲丸投を対象に事例的に検討した。データ収集は公認の競技会において行い、20名の男子砲丸投競技者の映像を、2台のハイスピードカメラを用いて300fpsで撮影した。そして、3次元DLT法によって取得した3次元座標値を、60、75、100、150、300 Hzの分析周波数に変換し、各種変数の比較を行った。その結果、砲丸の距離に直結する砲丸の初速度、投射角度、投射位置は分析周波数による影響を受けず、これらの変数を算出するためには、60 Hz程度の分析周波数で問題ないことが明らかとなった。一方で、加速度の値は分析周波数によってことなり、特に、150、300Hzにおける最大値は60 - 100 Hzにおける最大値と比較して有意に高値であり、その波形も明らかに異なっていた。このことから、複数回の数値微分や外力など係数を用いた計算を伴う変数の算出にはより高い分析周波数が必要であり、スポーツ動作中の詳細なメカニズムの解明のためにはハイスピードでの撮影と分析が好ましいことが示唆された。

キーワード : 3次元DLT法, キネマティクス, キネティクス

1. 緒言

スポーツ動作を評価するうえで、身体や用具の3

次元座標値を習得することは、キネマティクスやキネティクスといった変数の算出に繋がり有益である。3次元座標値の取得のために、実験室環境では、光学式3次元動作解析装置（モーションキャプチャーシステム）の技術発達が進み、高精度でかつリアルタイムでの取得が容易となっている。モーションキャプチャーシステムを用いた測定はスポーツ動作の研究

*湘南工科大学 工学部 人間環境学科 講師

にも応用されているが、その測定のためには、特定の施設や環境下での実施が不可欠であり、カメラの配置位置や反射マーカの取り付けなどによって、対象とするスポーツ動作の測定範囲や運動様式などに制約が生じてしまう。したがって、依然として、モーションキャプチャーシステムを用いてフィールドで行われる実際のスポーツ動作の評価することは難しい状況にある。

その一方で、フィールドでの測定では、ビデオカメラによって撮影された映像からの解析が一般的である。映像から3次元座標値を取得するためには、まず、複数台の異なる画角から撮影された映像を対象に、デジタル化という作業によって分析対象点のパソコンのウインドウ上における座標値を、映像のサンプリングレートと同等の分析周波数でフレームごとに取得する。その後、DLT法(Direct Transformation Method)によって、カメラごとに同一の画角で撮影された、実空間における座標値が既知であるキャリブレーションポイントとの関係から、回帰的に実長換算を行うことで、分析対象点の実空間における座標値を構築する(池上, 1991)。このDLT法によって算出される3次元の座標値に関して、林(2013)は、撮影に用いるカメラのレンズの性質(歪み)による誤差、複数台のカメラ間でのシャッタータイミングのずれ(同期のずれ)に起因する誤差、解析時におけるパソコンのウインドウ上の画素数に起因する誤差、デジタル化作業時における人為的な誤差があると指摘している。しかしながら、近年のハイビジョン化などの映像の高解像度化や、取得した座標値にフィルタをかけることによって被写体の動作以外の要因から生じた誤差を排除して解析を行うため、効果的な分析が可能である(林, 2013)。

カメラ技術の革新は目覚ましく、スマートフォンの内蔵カメラや家庭用のビデオカメラでもフルハイビジョン(1920×1080 pixel)かつハイスピード(120-300 fps)での撮影は、身近にできるものとなりつつある。その一方で、依然として実際のスポーツ動作を競技会などのフィールドで撮影し、3次元動作解析を行っている研究では、60 fps程度のサンプリングレートで撮影された映像から解析を行うものも散見される(Kons, 2021; Treacy et al., 2021)。筆者もこれまでに陸上競技の投てき種目を対象として映像から3次元動作解析を行ってきたが、同様に60 fpsで撮影したものをういてきた(加藤ほか, 2018; 加藤ほか, 2019)。この背景として、撮影から3次元座標値の取得に至るまでの時間的な影響があり、単純計算でも300 fpsで撮影した映像をデジタル化する場合、60 fpsで撮影した映像の5倍の時間を要する。したがっ

て、映像の撮影から各種変数を算出しデータを提示するまでの過程をより短時間にするためには、60 fps程度での映像の撮影に利点があり、そのため、特にデータを競技者や指導者へと提示する実践的な場面や研究では好まれる傾向にあると推察される。

これまでにスポーツ動作における3次元座標値の取得を目的とした映像の撮影条件として、林(2013)は、サンプリングレートが多いほど精度の高いデータの取得に繋がり、1~2秒程度の動作を対象とした場合でも、少なくとも300 fps程度が好ましいと指摘している。しかし、林(2013)の指摘はDLT法の演算時に生じる誤差を平滑化処理する際に中間データ部分が多い方が好ましいという理論に基づいた指摘ではあるものの、実際にサンプリングレート並びに分析周波数が異なる場合に算出されたデータにどの程度の差異があるかは提示されていない。また、田内(2012)は、陸上競技の男子やり投げを対象に、同一試技を60 fpsと300 fpsで撮影し、それぞれ3次元座標値を取得した際の誤差について言及しているが、映像の時間軸におけるイベントの同期に関する精度の言及にとどまっている。このように、サンプリングレートや分析周波数の変化に伴いスポーツ動作の解析結果がどのような影響を受けるかは提示されていない。このような背景を踏まえると、サンプリングレートや分析周波数の選択は、研究者の経験則に基づくほかない現状にある。

先述したように、今日においても特に競技会などを対象としたスポーツの実践的な場面や研究において、60 fpsで撮影された映像からの3次元座標値の算出が好まれている。したがって、多いサンプリングレートでの3次元座標値の取得と比較した場合に、どのような差異や特徴があるかを把握しておくことは、実際に解析し提示されたデータの信憑性や、限界を提示するうえでも有意義であると考えられる。

以上の背景から、本研究では、陸上競技の男子砲丸投を対象に、映像から3次元座標値を取得する際に、分析周波数の違いがどのような影響を及ぼすかを事例的に検討することを目的とした。

2. 方法

2-1. 対象者並びにデータ収集

対象者は男子砲丸投競技者20名(記録: 12.57 - 17.31 m)であり、対象者は全員右手投げであった。対象は公認の競技会における実際の動作とし、2台の高速度カメラ(GC-LJ20B, スポーツセンシング社製)によって撮影した。カメラの位置は、図1に示したよ

映像を用いた3次元動作分析における適切な分析周波数の検討：投運動を対象とした事例的検証（加藤）

うに、砲丸投の競技が行われる専用のピットに対して、投てき方向に対しての後方と、右側方とした。撮影条件は、フレームレート：300 fps、シャッタースピード1/4000 s、画角640×360 pixelとした。分析対象とする試技は対象者ごとに1試技ずつ抽出した。

撮影した映像を動作分析用のソフトウェア(Frame-Dias VI)を用いて、砲丸の中心1点を300 Hzでデジタル化し、各カメラの映像毎に300 fps相当の2次元座標値を取得した。そして、対象者の映像と同じ画角内に映し込んだ、実空間における座標値が既知である72点のキャリブレーションポイントからDLT定数を算出し、DLT法を用いて砲丸の3次元座標値を取得した。キャリブレーションの標準誤差はX軸：0.005 m、Y軸：0.007 m、Z軸：0.009 mであった。なお、2つの映像の時間上の同期は、砲丸が対象者の指からリリースされた時点(リリース)を基準に行い、分析区間はリリース前の50フレームからリリースまでの計50フレーム(約0.167秒)とした。この分析区間の動作は全ての試技において、図2に示したような最終的な投げの動作として砲丸が突き出される動作であった。

300 Hzで取得された砲丸の3次元座標値を一定間隔で間引くことによって、150 Hz、100 Hz、75 Hz、60 Hzでの分析周波数を有したデータを再構築し、それぞれを本研究における分析周波数として取り扱った。そして、座標成分ごとに残差分析によって最適遮

断周波数分析周波数(60 Hz：4-6 Hz、分析周波数75 Hz：5-7 Hz、分析周波数100 Hz：5-9 Hz、分析周波数150 Hz：8-13 Hz、分析周波数300 Hz：9-27 Hz)を決定し、Butterworth digital filterによって平滑化を行った。

2-2. 算出項目

平滑化した座標値を成分ごとに時間微分し合成することで、砲丸の速度を、砲丸の速度を時間微分することで砲丸の加速度を算出した。

また、リリース時における砲丸の速度を砲丸の初速度として、リリース時における砲丸の速度ベクトルが静止座標系における矢状面で作る方位角を投射角度として、リリース時における砲丸の位置座標のZ成分を投射位置(高さ)としてそれぞれ算出した。

算出後の変数は、スプライン関数を用いて時間軸を規格化し、分析区間の開始を0%time、砲丸のリリースを50%timeとした。

2-3. 統計処理

算出した変数は分析周波数ごとに平均値±標準偏差で示した。分析周波数間での変数の比較はSPSS Ver.26.0 (IBM Co.)を用いて一元配置分散分析とBonferroniの多重比較を行い、危険率5%未満を有意とした。

3. 結果

3-1. 砲丸の初速度、投射角度、投射位置

砲丸の初速度は、60 Hz：11.23±0.57 m/s、75 Hz：11.35±0.60 m/s、100 Hz：11.36±0.61 m/s、150 Hz：11.38±0.63 m/s、300 Hz：11.55±0.58 m/sであり、いずれの分析周波数間においても有意な差は認められなかった(図3-A, $p > 0.92$)。

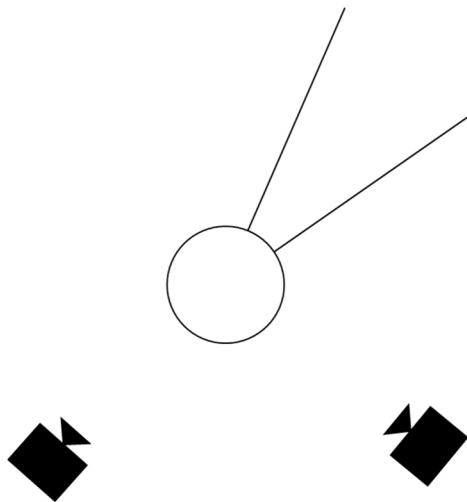


図1 データ収集時のカメラ配置

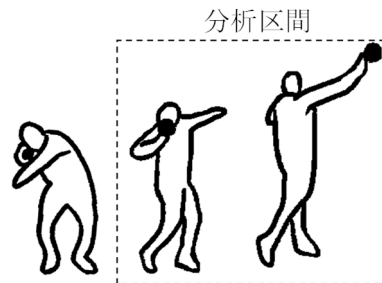


図2 分析区間の動作

投射角度は、60 Hz : $36.79 \pm 3.14^\circ$, 75 Hz : $36.74 \pm 3.13^\circ$, 100 Hz : $36.76 \pm 3.11^\circ$, 150 Hz : $36.54 \pm 3.19^\circ$, 300 Hz : $36.58 \pm 3.76^\circ$ であり、いずれの分析周波数間においても有意な差は認められなかった (図3-B, $p > 0.99$).

投射位置は60 Hz : 2.06 ± 0.09 m, 75 Hz : 2.06 ± 0.09 m, 100 Hz : 2.05 ± 0.09 m, 150 Hz : 2.06 ± 0.09

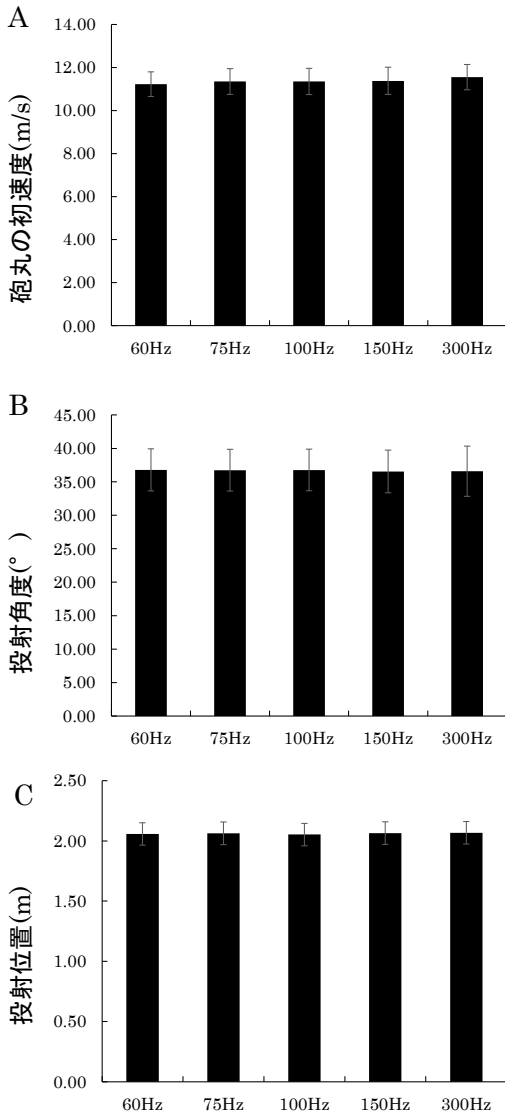


図 3 リリース時における砲丸の初速度, 投射角度, 投射位置の比較

m, 300 Hz : 2.07 ± 0.09 mであり、いずれの分析周波数間においても有意な差は認められなかった (図3-C, $p > 0.99$).

3-2. 砲丸の速度

分析区間における砲丸の速度の波形は図4に示した. 分析周波数間で波形は概ね同等であったが, 規格化時間における0-15%timeあたりでは, 分析周波数が高いほど砲丸の速度が低く, 分析周波数が低いほど砲丸の速度が高くなる傾向があった.

3-3. 砲丸の加速度

図5は砲丸の加速度の変化を示している. 分析区間における加速度の最大値は, 60 Hz : 65.80 ± 7.41 m/s², 75 Hz : 78.44 ± 7.71 m/s², 100 Hz : $82.34 \pm 133.58 \pm 7.03$ m/s²であった. 分析区間における最大

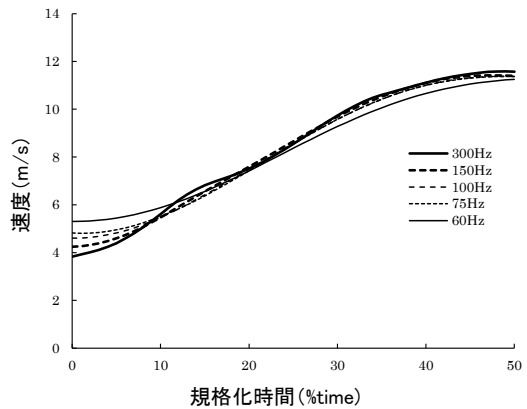


図 4 砲丸の速度の平均値

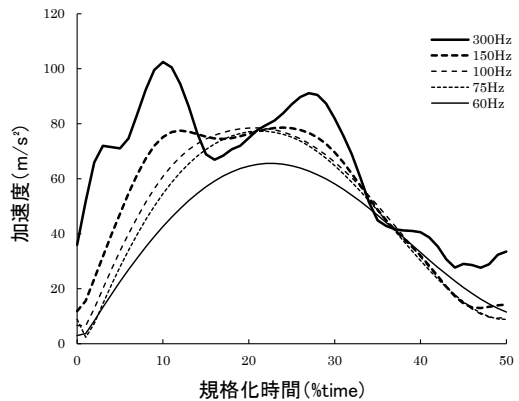


図 5 砲丸の加速度の平均値

値は、300Hzがその他の全ての分析周波数よりも有意に高値であり（ $p < 0.01, 0.05$ ），150Hz・100Hzは60 Hzよりも高値であった（ $p < 0.01, 0.05$ ）。

また、波形に関しては、60 - 100 Hzではピークが1回出現するような波形であったが、150, 300 Hzでは2回ピークが出現するような波形をしていた。

4. 考察

4-1. リリース時における砲丸の変数に関して

本研究では、映像から3次元座標値を算出する際に分析周波数の違いがどのように影響するかを、砲丸投の動作を対象に事例的に検討した。その結果、リリース時における砲丸の初速度、投射角度、投射位置に分析周波数間で有意な差は認められなかった（図3）。したがって、砲丸の初速度や投射角度、投射位置を算出する際に分析周波数の変化が及ぼす影響はほとんどなく、60 Hzでの分析、つまり60 fpsで撮影した映像を用いても十分信頼できる値を算出できることを裏付けている。前述の変数は、投てき初期条件やリリースパラメータとされ、陸上競技の投てき種目においてはその投てき距離に直結する重要な変数である（Hay, 1985）。そのため、科学的なデータを競技者や指導者へと提示する際にも算出される機会が多く、全国高校総体における陸上競技種目においても、日本陸上競技連盟科学委員会の活動として、即時的なフィードバックのための資料として算出されている。このような比較的短時間でデータを算出する必要がある場面において、60 Hzでも十分、つまり300 Hzなどの高い分析周波数での解析が必ずしも必要ではないということは、解析作業にかかる時間やその効率化という観点から有益な示唆といえよう。

4-2. 砲丸の速度と加速度の経時的な変化に関して

砲丸の速度の波形に関して、分析周波数で大きな差異は観察されなかったが、規格化時間において0 - 15 %timeのあたり、つまり砲丸の速度が低いタイミングでは、各分析周波数の平均値に差異が観察された（図4）。この点については、続く加速度の波形と交えて考察していく。

砲丸の加速度は、分析区間における最大値に有意な差が認められ、分析周波数が高値（150・300Hz）であるほど最大値も高値であった。また、経時的な波形に関しても60 - 100 Hzと150・300 Hzでは明らかに違う特徴が観察された。加速度は、単位時間当たりの速度変化の指標であり、前述の砲丸の速度との関連を踏まえると、60 - 100 Hz程度の分析周波数では、

より詳細な単位時間当たりの砲丸の速度変化を評価できていないと示唆される。身体運動を対象とする場合、数値微分に数学的な極限計算を用いることができないので、離散時間を用いた算出を行う。そのため、スポーツ動作を3次元座標値から評価する際には、速度や加速度を算出したい時点のデータを取得する際に、離散時間上の前後するデータを用いて、3点もしくは5点微分公式を用いる（阿江と藤井, 2002）。分析周波数が60 Hzにおけるデータの時間軸は、1/60秒間隔となるが、300 Hzの場合は1/300秒である。つまり、同一の時間内で、300 Hzでは60 Hzの5倍のデータ数が存在することになる。また、3次元座標値は各分析周波数における座標成分ごとに平滑化処理を行っている。以上のことから、同一時間内におけるデータの数と平滑化処理の影響として、分析周波数が低値（60 - 100 Hz）の条件では詳細な砲丸の速度変化が反映されていなかったと示唆される。したがって、時間微分を2回繰り返す加速度などの変数を評価するためには、150 Hz程度以上での分析周波数が適していると示唆される。

4-3. 各種変数を算出するうえでの分析周波数の影響

スポーツ動作中の3次元座標値は、数値微分や数値積分、さらには外力などの係数をかけあわせた方程式によって、力学的な変数の算出にも繋がる。このような変数の算出は、スポーツ動作やその結果として発揮されるパフォーマンスという諸現象の「メカニズム」の解明に繋がる。本研究の結果に基づくと、砲丸の速度や角度などの、砲丸投のパフォーマンス（投てき距離）に直結する変数を高い精度で評価できるということから、速度や角度などの、座標値を用いた計算や1回の時間微分から算出可能なキネマティクスの評価に関しては、分析周波数が60 - 100 Hz程度の条件であっても適切な評価が可能であると考えられる。

一方で、加速度に関する結果に基づくと、複数回の時間微分や、各種係数などの要因が多い計算が伴う変数の算出には、150 Hz以上の分析周波数が必要になると考えられる。本研究で取り上げた砲丸投の場合、砲丸だけを対象としても、砲丸に作用した力学的な力や、パワー、力積などの重要性が既知である（橋本ほか, 2004；植屋, 2004）。力学的な力Fは下記の式（1）、パワーPは式（2）、力積Iは式（3）である。

$$F = ma \quad \dots (1)$$

$$P = F \cdot v \quad \dots (2)$$

$$I = \int_{t_A}^{t_B} F dt \quad \dots (3)$$

ここで、係数*m*は物体の質量、係数*a*は物体の加速

度, 係数 v は物体の速度, 係数 t はある時点 A からある時点 B までの時間である. このような力学的な変数は, 力学的なエネルギーの流入出や, 身体各部位における動作の貢献度の算出 (橋本, 2004) にも用いられることから, 詳細なメカニズムを解明するために不可欠な変数である. したがって, 映像からスポーツ動作中における 3次元座標値を取得し, そこからスポーツ動作のメカニズムの解明を議論するためには, 150 Hz 程度以上の分析周波数が必要であり, 240 ~ 300 fps というハイスピードで撮影された映像が必須と示唆される.

また, 本研究で取り上げた砲丸投は, 陸上競技の投てき種目の中でも, 物体の速度が最も低く, 世界のトップ選手においても 14.0 m/s (50 km/h) 程度である (Ohyama-Byun et al., 2008). 160 km/h (44.4 m/s) を超える野球の投球速度と比較してみると, 例えば, 同一速度で変化し, 分析周波数が 60 Hz の場合, 単位時間約 0.167 秒あたりに, 砲丸投では約 2.34 m の移動が生じる可能性があるのに対して, 野球の投球では 7.41 m もの移動が生じる可能性がある. 速度の加減速や空気抵抗, 重力加速度などの影響を考慮したとしても, 両者の評価を同一の分析周波数で行った場合, 速度などのキネマティクスに関しても, 野球の投球の方が詳細な評価は行えておらず誤差も大きいであろうことは容易に想像できる. したがって, 被写体となる分析対象の絶対的な速度によって, 適切な分析周波数が異なる可能性について, 更なる検討が必要になると示唆される.

5. 結論

本研究では, 映像から 3次元座標値を算出する際の分析周波数の影響を, 陸上競技の砲丸投を対象に事例的に検討することを目的とした. その結果, 砲丸投における動作の場合, 座標値から算出できる変数に関して, 特に時間微分が 1 回で済む速度や角度などのキネマティクスの算出には, 60 – 100 Hz 程度の分析周波数でも十分であることが明らかとなった.

一方で, 2 回の時間微分が伴う加速度の評価には, 150 Hz 以上の分析周波数が必要と示唆され, 特に, キネマティクスに関する変数の算出や, スポーツ動作の詳細なメカニズムを解明するためには, ハイスピードで撮影された映像が必須となることが明らかとなった. 以上の結果は, 映像を用いた 3 次元動作分析を行う際にそのサンプリングレートや分析周波数を選択するための新たな知見になると考えられる.

参考文献

- 阿江 通良・藤井 範久 (2002) スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店, 東京, pp.165-172.
- 橋本 勲, 大北 英紀, 阪本 孝男, 斉藤 良太, 安藤 好郎, 佐野 真也, 池上 康男 (2004) 大学女子砲丸投げ選手のエネルギー発揮に関する研究—脚部および体幹の役割について—. 中京女子大学研究紀要, 38 : 21-29.
- Hay, J., G. (1985) *The Biomechanics of Sports Techniques*, 3rd ed. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ., pp.475-487.
- 林 忠男 (2013) DLT 法を用いた競技スポーツの分析. 情報メディア学会誌, 67 (11) : 932-935.
- 池上 康男 (1983) 写真撮影による運動の 3 次元解析法. *Jpn. J. Sports Sci.*, 3: 163-170.
- 加藤 忠彦, 瓜田 吉久, 金高 宏文, 前田 明 (2018) 砲丸投・回転投法における以降局面の運動量が投てき距離に及ぼす影響. 陸上競技研究, 112 : 31-38.
- 加藤 忠彦, 瀧川 寛子, 野中 愛里, 前田 奎, 山本 大輔, 塚田 卓巳, 村上 雅俊 (2019) 国内女子砲丸投げ競技者における世代別の投てき動作の特徴: 日本選手権と U20・U18 日本選手権の比較. 陸上競技研究紀要, 15 : 257-260.
- Kons, M., S. (2001) An investigation into the release factor effects of hammer throw. *ISBS proceeding Archive*, 39(1): 221-223.
- Ohyama Byun, K., Fujii, H., Murakami, M., Endo, T., Takesako, H., Gomi, K., and Tauchi, K. (2008) A biomechanical analysis of the men's shot put at the 2007 World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 23: 53-62.
- 田内 健二, 藤田 善也, 遠藤 俊典 (2012) 男子やり投げにおける投てき動作の評価基準. バイオメカニクス研究, 16 (1) : 2-11.
- Tracy, A., Kons, A. and Leigh, S. (2021) Influence of landing quadrant on elliptical orbit and its reaction to release parameters of the hammer throw. *ISBS proceeding Archives*, 39(1): 304-307.
- 植屋 清見 (2004) 砲丸投のバイオメカニクス. (金子公宥・福永哲夫 編), バイオメカニクス身体運動の科学的基礎. 杏林書院 東京, pp247-252