

《論 文》

円盤投げのトレーニング手段に関する バイオメカニクス的研究

—円盤重量の変化が投てき動作に与える影響—

高松 潤二, 桜井 徹

A Biomechanical study of training methods in Discus throwing

—Effects of over- and underweighted discuses in throwing pattern—

Junji TAKAMATSU, Toru SAKURAI

キーワード：円盤投げ，円盤重量，3次元動作分析，関節力，関節トルク

Keywords: Discus throw, weight of discus, three-dimensional motion analysis, joint force, joint torque

[要 旨]

本研究の目的は，円盤投げを対象動作として，投てき物の負荷重量を変化させたときに人間の身体運動にどのような影響があるのかをバイオメカニクスの明らかにすることであった。DLT法を用いて被験者の右腕の各部位と円盤の3次元座標を算出し，①円盤の速度，②円盤のリリースパラメータ，③円盤に作用する力，④肩関節に作用する力を算出した。その結果，以下のことが明らかになった：

- ・円盤重量の増大に伴ってリリース時の速度と角度は低下する傾向にあった。
- ・円盤重量の増大に伴って円盤に作用する力は増大する傾向を示したが，被験者間で大きく異なる結果が得られた。特に5.00kgでは被験者間で最大300Nを超える差が生じていたのみでなく，ピーク出現のタイミングもバラバラであった。
- ・肩関節に作用する力とトルクに関して，円盤重量が大きいほど関節力は低くなり，逆に関節トルクは大きくなる傾向を示した。

1. 緒言

円盤投げは，国際的な競技力が低いことも

あってか，同じ陸上競技投てき種目のやり投げやハンマー投げと比較して日本国内では非常にマイナーな競技種目である。男子円盤投げの

日本記録は60.22mで、1979年以来更新されておらず、世界記録(74.08m)との差は約14mである。また、女子の日本記録は58.62m(2007年)であるが、世界記録は76.80mであり、その差は約18mである。このように、我が国の円盤投げのレベルはかなり低いと言わざるを得ない。ただし、男女の世界記録が達成されたのはそれぞれ1986年と1988年であり、世界的に見ても記録の停滞状況が続いているようである。

円盤投げの記録には、円盤が投げ出された後の空気抵抗に打ち勝ち、かつこれをいかに有効利用するかが重要であるが、それ以前に投げ出しの瞬間の初期条件であるリリースパラメータ、すなわちリリース速度、リリース角度、リリース高の3つが極めて重要である。特にリリース速度の重要性についてはさまざまところで報告されており、理論的にも重要であることを指摘できる。従って、円盤投げのトレーニングは、円盤を持った状態で投てき腕のスイング速度をいかに高められるかが重要な課題の一つとなる。

人間の動作速度を高めるための一般的なトレーニング理論として、1970～1980年代に旧ソビエト連邦を中心に陸上競技の投てき種目(砲丸投げおよびやり投げ)についていくつかの報告がなされている^{10) 11) 19)}。それらの報告では、動作速度を高めるためには負荷重量を大きくする、例えば投てき物を重くすることで筋の肥大を促すようなトレーニングを繰り返しても、必ずしも速度の向上は見られず、逆に負荷を軽減して人体の動きを通常よりも高速になるようにトレーニング手段をデザイン・実施することで、結果としてパフォーマンスは向上するとしている。村木¹⁶⁾は、これを負荷軽減法と名付けて分類しており、その実践的有効性を指摘している。負荷軽減法に関する研究は、その後上記種

目以外にスプリント走^{2) 3) 14) 15)}や野球のピッチング^{5) 6) 12) 13)}等で盛んに研究されるようになり、キューバではこの考え方を応用した野球のピッチングトレーニングを考案して、ピッチャーの球速向上に成功しているとされている。このうち、円盤投げの負荷軽減法に関する研究は僅少で、この種目での効果やトレーニング法のあり方等については明確になっていない。

西藤¹⁷⁾は、大学陸上競技部に所属する円盤投げの選手を対象にして、重い円盤を投てきした後に正規重量の円盤を投げた場合と、軽い円盤を投げた後に正規重量の円盤を投げた場合では、後者のほうが高いパフォーマンスを示す傾向にあったことを報告している。

Tancred¹⁸⁾は、15歳以下の円盤投げ初級者を被験者として、通常よりもやや重い円盤を用いてトレーニングさせたグループのほうが通常の重量の円盤でトレーニングを続けたグループよりも記録が顕著に向上したが、さらにもっと重い円盤でトレーニングしたグループでは逆に記録が向上しなかったと報告している。

これらの研究は、いずれもそのような結果になったことの背景や原因、メカニズム等については究明されておらず、円盤重量を変化させたトレーニングの体系を整備するには未だ十分な知見が蓄積されていない。円盤投げのように回転動作を伴う運動様式においては、負荷重量の変更が投動作のパターン(タイミング、動作範囲等)に大きく影響を及ぼす可能性があり、負荷重量の変更に伴う動作の変化や身体的負担の増減について明らかにできれば、専門的トレーニング手段として円盤重量を変化させる上での具体的な指針を与えることにつながるであろう。

本研究の目的は、円盤投げを対象動作として、投てき物の負荷重量を変化させたときに人間の

身体運動にどのような影響があるのかをバイオ
メカニク的に明らかにすることである。

2. 方法

(1) 被験者

表1は、本研究で対象とした被験者の基本的な特性を示したものである。本研究では、日常的に円盤投げ競技のトレーニングを行っている、もしくは円盤投げの競技経験がある者7名を被験者とした。各被験者の競技年数は4～10年で、年齢は19～25歳であった。いずれの被験者も中級レベル以上の競技力を有するもので、右利きであった。なお、被験者には、本研究の目的や具体的な手順について口頭および書面によって説明し、文書により同意を得た者のみを対象と

(2) 実験およびデータ処理

図1は実験における機器設定状況を示したものである。投てき方向に対して右側方および後方に2台の高速度ビデオカメラ（CASIO社製EX-F1）を三脚で固定し、毎秒300コマ（電子シャッター1/2000秒）で各被験者のすべての投てき試技を撮影した。また、カメラ間のタイミングを同期するため、LEDの発光部分をカメラのレンズ近傍で同時発光させる方法を用いた（DKH社製LED型シンクロナイザPTS-110）。試技の撮影の前には、後の3次元座標算出に用いる較正用映像を撮影した。図2は撮影した較正用映像と較正用ロッド（測量棒）を設置した位置、3次元座標算出の基準となる座標系を示

表1 被験者の基本的特性

	身長 (m)	体重 (kg)	年齢 (歳)	競技歴 (年)	自己ベスト記録 (m)
A	1.75	110	25	10	51.24
B	1.75	99	21	6	43.13
C	1.79	70	22	6	33.38
D	1.67	75	21	6	35.95
E	1.75	70	23	10	45.35
F	1.85	109	18	4	39.00
G	1.74	94	19	4	32.12

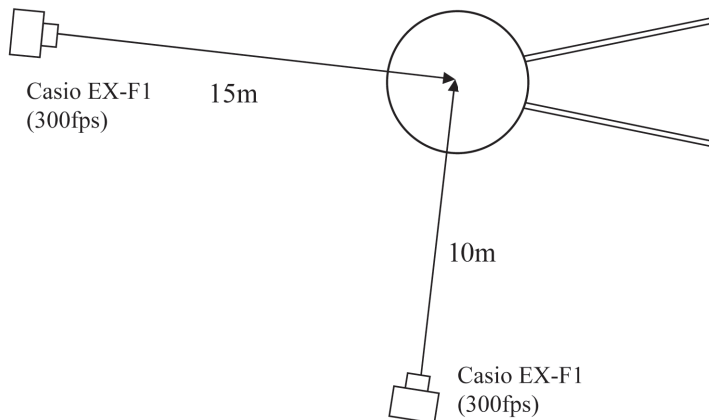


図1 投てき用サークルに対するカメラの配置

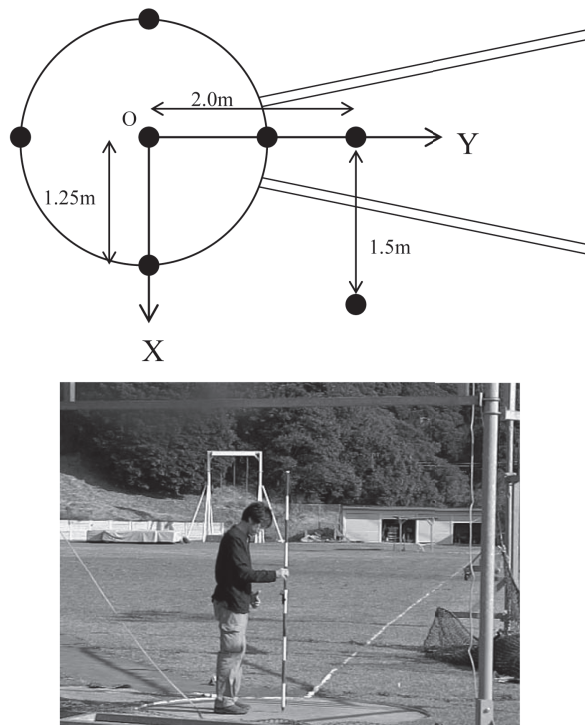


図2 較正用ボールの設置位置と座標系の設置

したものである。較正用ロッドを図中に示した設置位置に垂直に立て、これを撮影するという作業を各設置位置に置いて順次行うことで、3次元座標算出のための分析対象空間の較正用映像とした。座標系は投てき方向をY軸、鉛直上方をZ軸とし、X軸は投てき方向に対して右方向であった。

実験試技には、以下に示す5種類の重さの円盤および投てき物を用いて1回ずつのスタンディングスローを行わせた。投てきの順序は下記の通りであった。

- ①2.00kg円盤（公認規格、直径220mm）
- ②2.25kg円盤（練習用、直径220mm）
- ③1.75kg円盤（ジュニア用公認規格、直径210mm）
- ④5.00kgウェイトトレーニング用バーベルプ

レート

- ⑤スポンジボール（ほぼ0.00kg）

各試技の間には十分な休息時間を設け、疲労の影響がないよう配慮した。これらの試技を上記した2台のカメラで撮影した。

実験で得られた映像から被験者の右手、右手首、右肘関節、右肩関節、および円盤の計5点の2次元座標を毎秒100コマで読み取り、DLT法^{1) 9)}により3次元座標を算出した。算出した身体各部位および円盤の3次元座標は、残差分析により最適遮断周波数を決定する方法²⁰⁾を用いて各分析点について4次の低域通過型バタワースデジタルフィルタで平滑化した。なお、決定された遮断周波数は6～10Hzの範囲であった。

(3) 算出項目

上記のようにして得られた身体各部位および投てき物の3次元座標から、以下のパラメータを算出した：

①円盤の速度

算出した円盤の3次元座標を時間で数値微分（中央差分）し、投てき試技中の円盤の速度を算出した。

②円盤のリリースパラメータ

算出した円盤速度データを用いて、円盤が手からリリースされた瞬間における円盤の速度ベクトルの大きさをリリース速度、速度ベクトルがXY平面となす角度をリリース角度、Z座標をリリース高と定義し、これらを算出した。

③円盤に作用する力

円盤の速度データを数値微分して得られた加速度と円盤の質量から、投てき試技中に円盤に作用する力 F を以下の式を用いて算出した。

$$F = \sqrt{(ma_x)^2 + (ma_y)^2 + (ma_z - mg)^2}$$

ここで、 m は円盤の質量、 a_x a_y および a_z は X, Y および Z 軸方向の円盤の加速度、 g は重力加速度 (9.8m/s^2) を示す。

④肩関節に作用する力とトルク

右腕を手・前腕・上腕からなる3リンクの剛体にモデル化し、算出した円盤に作用する力の反作用が右手に作用したと仮定して、ニュートン・オイラー法を用いて投てき側の腕の肩に作用する静止座標系の各軸方向の関節力と関節トルクを算出した。算出に際しては、右腕の身体部分慣性係数を阿江⁴⁾、剛体リンクのモデル化および力とトルクの算出法を藤井と阿江⁷⁾の方法によった。得られた関節力と関節トルクは、3軸の各成分を合成した値を用いて比較した。

3. 結果

(1) 円盤の速度変化とリリースパラメータについて

図3は、投てき中における円盤速度の変化を示したもので、XY平面における肩関節から手首に向かう位置ベクトルがX軸に対して角度が -180 度を越えた時点から円盤をリリースするまでのデータを示している。また、時刻ゼロは前述の位置ベクトルがX軸に対して角度 0 度を越えた時点である（リリースが 0 度となる手前

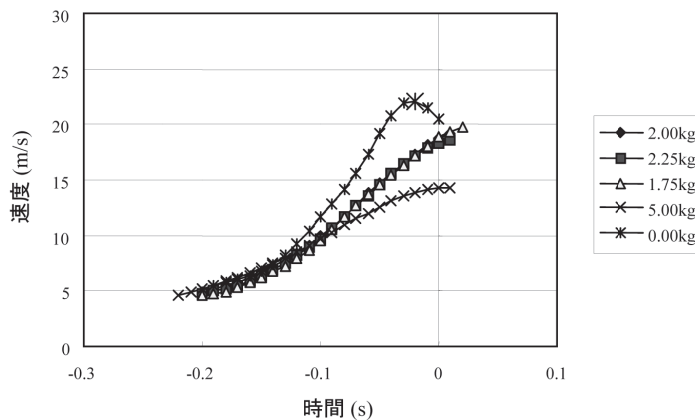


図3 円盤速度の変化（被験者A）

で発生した場合、時刻0よりも手前でデータは終了している)。なお、ここでは典型例として被験者Aのデータを示している。図3を見ると、0.00kgの速度が中盤あたりから急激に上昇し、値も最も大きかった。5.00kgは全体的に低い値を示し、ピーク値も最小であった。それ以外の3種の重量(1.75~2.25kg)については、ピーク値は重量毎に異なるものの、変化パターンはいずれも類似していた。

表2は、全被験者の各重量におけるリリースパラメータを示したものである。また、図4は、リリースの速度、角度、および高さを全ての被験者についてそれぞれ円盤重量毎に値がどのように変化しているかを示したものである。図4を見ると、速度は円盤重量が軽いほど大きな値を示す傾向にあったが、被験者によっては1.75~2.25kgの円盤で速度がほとんど同じ値を示す被験者もいた。角度については、全体として重量が軽くなるほど大きな値を示していたが、0.00kgはいずれの被験者についても最も小さな値を示した。高さについては、速度や角度のような全体的な傾向は見られず、被験者毎に大きく異なる変化パターンを示していた。

(2) 円盤に作用する力について

図5は、全ての被験者について円盤に作用する力を示したものである(0.00kgの試技については計算できないため除外)。これを見ると、1.75~2.25kgの試技については、円盤重量が大きくなるにつれて力のピーク値も大きくなる傾向にあったが、5.00kgについては被験者毎に顕著に異なるパターンを示し、被験者によっては正規重量の2.00kgでの試技におけるピーク値よりも小さな値を示していた。5.00kgにおける被験者間の差は最大で300Nを越えていた。また、

5.00kgの試技は他の重量とはピークの出現タイミングが異なる等、特異な変化パターンを示していた。

(3) 肩関節に作用する力とトルクについて

図6は、肩関節に作用する力とトルクを示したもので、上が関節力、下が関節トルクである。ここには、典型例として被験者A(左)とE(右)を示している。これを見ると、関節力は両被験者ともに5.00kgにおいて最も小さなピーク値を示し、0.00kgが最も大きなピーク値を示していた。特に被験者Eについては、円盤重量が軽くなるほど関節力のピーク値は大きくなっていた。関節トルクについては、0.00kgが最も小さなピーク値を示し、1.75kgと5.00kgで比較的大きなピーク値を示していた。ただし、いずれの重量についてもピーク値出現のタイミングについては重量毎、被験者毎で異なる傾向を示していた。

4. 考察

図3に示したように、最も円盤のリリース速度が大きかったのはいずれの被験者も0.00kgのスポンジボールであった。その大きさは被験者によって異なるが、2.00kgのピーク速度に対して7名の平均で4.24m/s上回っていた。また、表2に示したように、最も0.00kgでの速度が大きかったのは被験者Eで、これは円盤投げの世界レベル競技者を対象に競技会において報告されている上位選手の値^{8) 21)}と同等であった。このことは、今回の被験者に関して言えば、なにも負荷のない状態で腕を振り切ったときの速度で円盤投げを行わなければ世界レベルには到達しないことを意味する。ただし、本研究では

表2 各被験者の各円盤重量におけるリリースパラメータ

	2.00kg			2.25kg			1.75kg			5.00kg			0.00kg		
	速度 (m/s)	角度 (deg)	高さ (m)	速度 (m/s)	角度 (deg)	高さ (m)	速度 (m/s)	角度 (deg)	高さ (m)	速度 (m/s)	角度 (deg)	高さ (m)	速度 (m/s)	角度 (deg)	高さ (m)
A	19.15	31.4	1.47	18.57	28.4	1.47	19.69	32.0	1.60	14.32	30.5	1.54	22.11	25.1	1.30
B	17.86	34.5	1.58	17.12	32.3	1.49	18.69	35.0	1.55	12.06	34.2	1.61	20.86	27.2	1.64
C	15.92	32.4	1.60	15.32	30.8	1.55	16.58	31.9	1.62	10.78	30.5	1.57	21.94	29.0	1.64
D	16.40	33.2	1.48	15.32	34.1	1.52	16.94	35.8	1.53	10.32	31.1	1.60	21.18	27.8	1.33
E	17.40	33.4	1.58	16.79	33.7	1.37	18.95	34.6	1.52	10.61	27.2	1.28	23.49	25.7	1.72
F	17.27	33.8	1.59	16.67	35.5	1.62	18.08	37.2	1.57	11.83	34.7	1.74	21.55	23.7	1.36
G	16.32	35.1	1.50	15.84	33.7	1.57	15.98	35.8	1.65	10.89	30.2	1.20	18.86	29.7	1.68

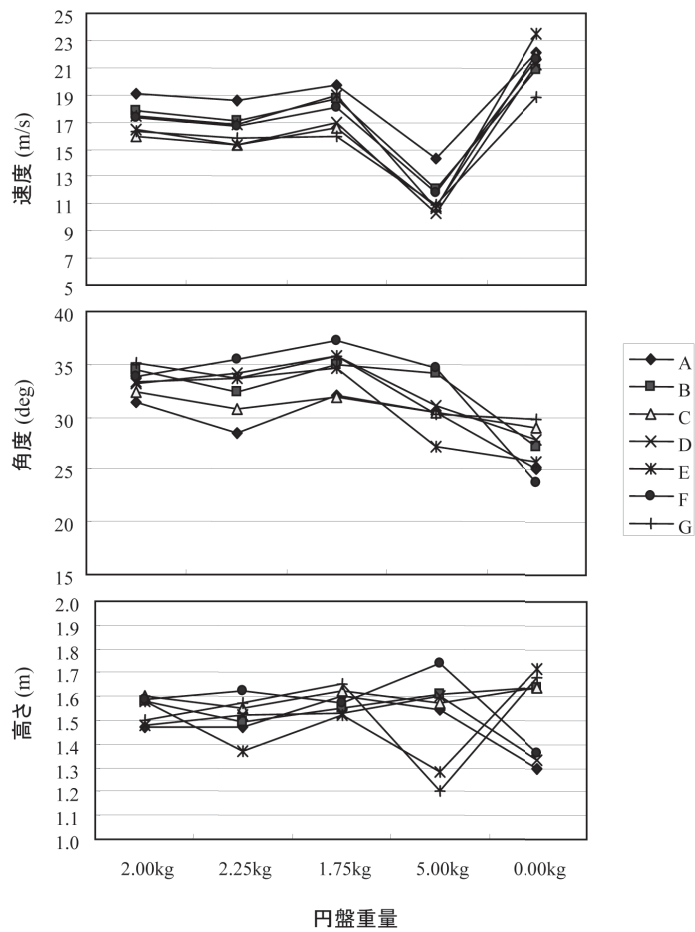


図4 円盤重量の変化に伴うリリースパラメータの変化

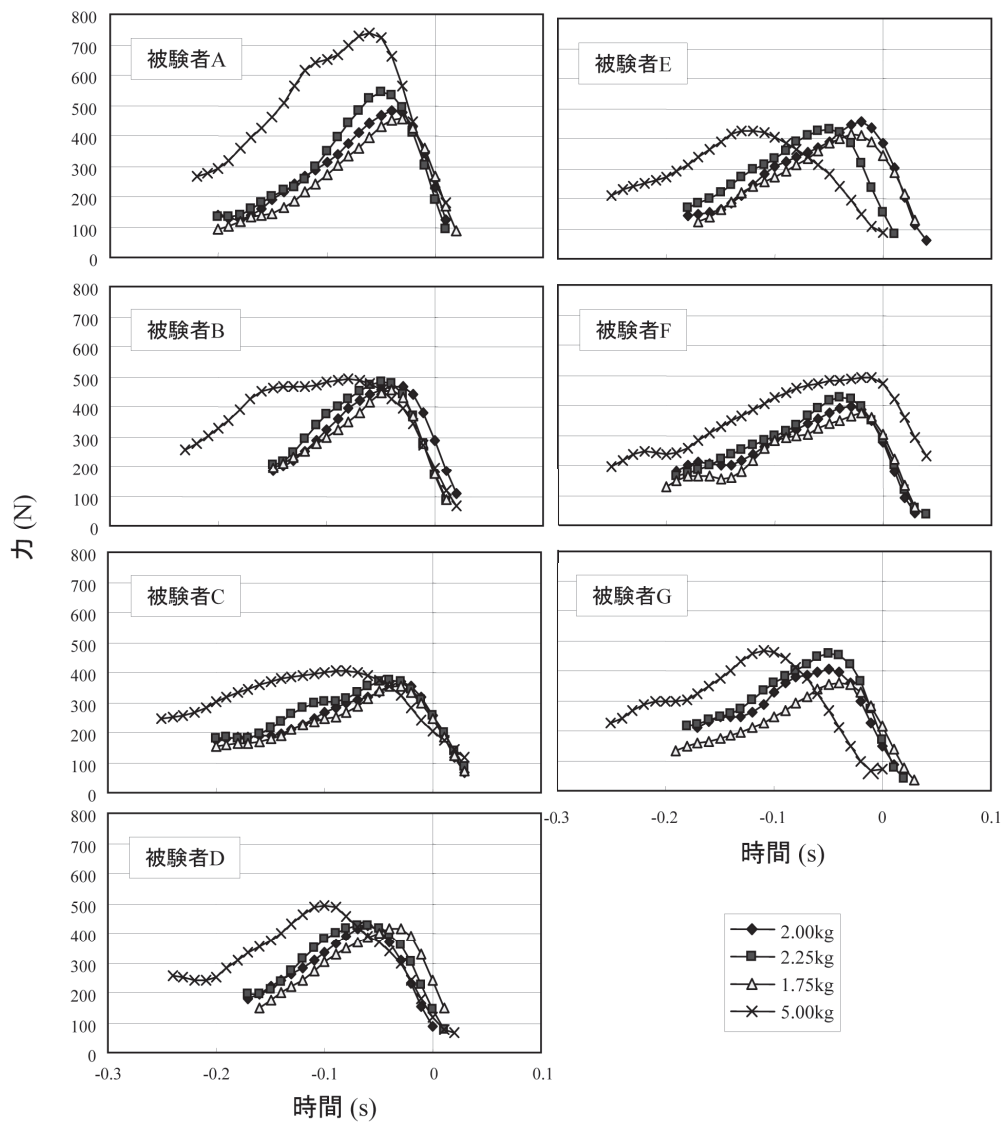


図5 円盤に作用する力

5種類の円盤重量の差が均等ではないので、例えば1.75kgよりも軽い女子用円盤（1kg）を用いた場合に、スタンディングスローでも世界レベルの速度に到達するかどうかを別途検討する必要があるだろう。

次に、図4に示したように、リリース角度が

1.75kgの円盤で大きくなる傾向が見られた。これは、円盤の重量が軽いため、重量に抗して発揮すべき力が軽減されたことが要因の1つとして挙げられる。このことは、技術的にリリース角度を大きくすることに課題を抱えている競技者のための技術トレーニングとしての可能性を

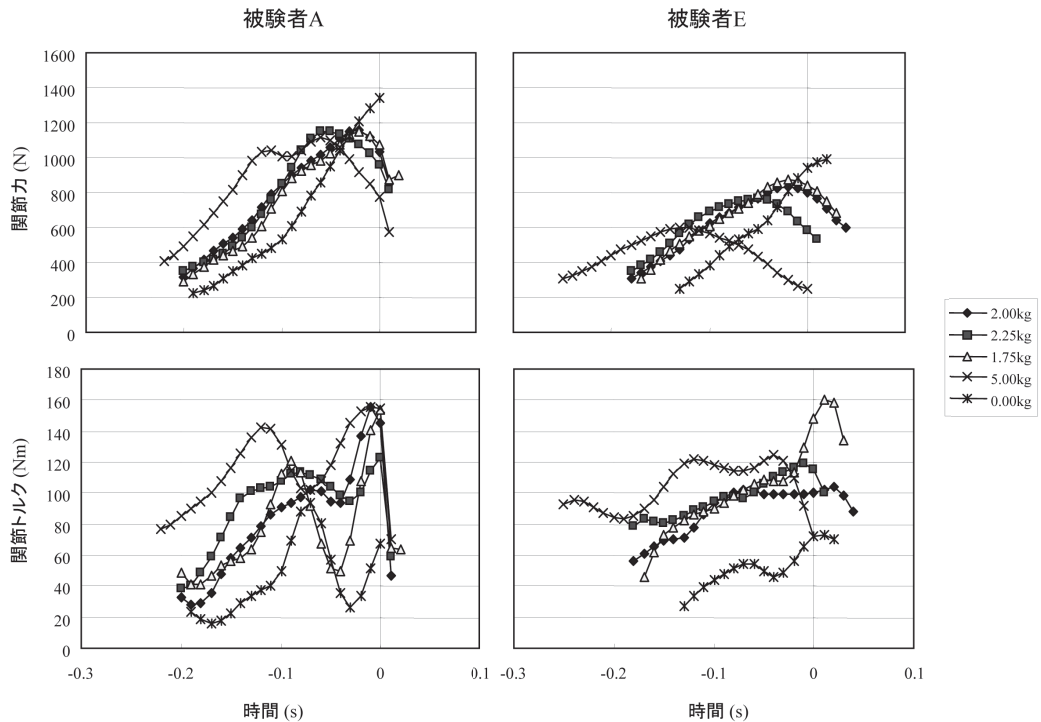


図6 肩関節に作用する力とトルク

示唆している。なお、最も軽い0.00kgにおいて最も角度が低くなっているのは、投てき物の形状が円盤状でなかったことや、通常の円盤に対して運動感覚が違いすぎることから来る違和感によるものであろう。

図5に示した各被験者の試技における円盤に作用する力は、1.75～2.25kgの重量に関しては全体的に同じ傾向の変化パターンを示していたが、5.00kgは他の重量とも、あるいは被験者毎にも異なる変化パターンを示した。例えば、被験者Aの5.00kgのピーク値と被験者Cのそれとでは、300N以上の差があった。また、被験者Eは比較的早いタイミングで力のピークを迎えていたが、被験者Fはリリース直前であった。これらのことは、5.00kgのような極端に重い円盤では、体力トレーニングとしての位置づけで行

うべきであり、技術の習得を視野に入れたものとしては考えるべきではないと思われる。このことは、Tancredが報告した、ジュニア期の選手において重すぎる円盤を用いたトレーニングが記録向上にはつながらない（実際のデータはトレーニング前よりも平均記録が悪化している）ことの根拠を示していると考えられる。

専門的トレーニングにおいて体力的な側面に着目して効果を高めようと考え、選手の特長に応じてどのようなトレーニング課題を与えるべきかが重要となる。図6に示したように、動作に習熟した上級者であっても、肩関節の力は最も重量の大きい5.00kgにおいて最大になるわけではなく、逆に最小のピーク値を示していた。これは、大きな重量に対して関節に障害を発生させないよう反射的に筋力発揮が抑制

されたのかもしれない。また、円盤形状が通常のものとは異なっていて操作になれていなかったということも要因としてあげられよう。逆に、0.00kgの試技において関節力が最大を示す被験者がほとんどであったが、これについては、投てき腕のスイング速度が他の重量の場合よりも大きいため（図3）、一旦速度が大きくなった腕を減速させる必要があり、その際に発揮されたものであると考えられる（加えて、本研究ではデータ範囲をリリースで区切っているため図6には示していないが、リリース後も更に関節力が大きくなっていたことを付記しておく）。また、ピークに至るまでの過程で関節力が低いレベルで推移しているため、いわゆる筋力トレーニングのために0.00kgを採用することはあまり効果を期待できないであろう。ただし、運動経過全体を考えると、大きく加速した腕の減速能力を向上させることは、結果としてパフォーマンスの向上に部分的には寄与すると考えられる。次に、肩の関節トルクに関しては、重量の増大とともにトルクのピーク値も大きくなる傾向を示していたが、本研究の結果からは、5.00kgでは投てき局面全体にわたる筋力の向上、1.75kgではリリース付近における筋力の向上が期待できるようである。特に1.75kgでは、正規重量よりも軽いにもかかわらず瞬間的に大きな力が発揮されていることは注目すべきで、円盤のスピードが高いまま大きな筋力発揮を促すという効果が期待できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、円盤投げのトレーニングで用いられるスタンディングスローを対象として、円盤重量を変化させた投てきにおいて被験者の身

体および動作にどのような影響を及ぼすのかを検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 円盤重量が大きくなるほど、以下のような傾向が見られた：
 - ①リリース速度の低下（0.00kgで全ての被験者が最大速度を達成）
 - ②リリース角度の低下（ただし0.00kgでは全ての被験者が最小値）
 - ③円盤に作用する力の増大
- (2) 投動作中の肩関節に作用する力とトルクは、他のパラメータとは異なる変化を示した。特に、以下のような特徴が見られた：
 - ①肩の関節力は5.00kgの円盤で必ずしも大きな力が作用するとは限らない。
 - ②関節トルクのピークは5.00kgと1.75kgで大きかった。

以上のことから、円盤投げの専門的体力（特に肩の関節トルク）を大きくするならば5.00kg円盤は有効であること、また、大きな力やトルクを発揮しつつ円盤速度も大きかった1.75kgでの投てきトレーニングは、正規重量の円盤速度変化パターンと大きな違いが無かったことを考え合わせると、運動技術の習得もかねて筋力向上を期待できることからパフォーマンスを高める上で大きな可能性を有していることなどが示唆された。

参考文献

- 1) Abdel-Aziz, YI and Karara, HM (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: ASP Symposium on Close Range Photogrammetry. American Society of

- Photogrammetry, Falls Church, VA, pp.1-19.
- 2) 阿江通良・村木征人・宮下憲・伊藤信之・森田正利 (1989) 牽引走が100m走の加速および速度持続局面に及ぼす影響. 平成元年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告No.VII「スプリントアシスティッド・トレーニングに関する研究」(第2報), pp.37-45.
 - 3) 阿江通良・村木征人・宮下憲・伊藤信之・森田正利 (1990) 各種の牽引走が疾走中の地面反力に及ぼす影響. 平成2年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告No.VIII「スプリントアシスティッド・トレーニングに関する研究」(第3報) - II, pp.10-15.
 - 4) 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Japanese J. Sports Sci. 15 (3) : 155-162.
 - 5) DeRenne C, Buxton BP, Hetzler RK, and Ho KW (1994) Effect of under- and overweighted implement training on pitching velocity. Journal of Applied Sports Science Research 8(4) : 247-250.
 - 6) Escamilla RF, Speer, KP, Fleisig GS, and Barrentine, SW (2000) Effect of throwing overweight and underweight baseballs on throwing velocity and accuracy. Sports Medicine 29(4) : 259-272.
 - 7) 藤井範久・阿江通良 (1994) 運動の拘束条件を考慮した剛体リンクモデルによる身体運動シミュレーションに関する研究. 第15回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp. 233-236.
 - 8) Gregor RJ, Whiting WC, and McCoy RW (1985) Kinematic analysis of Olympic discus throwers. In: J. Sport Biomech. 1 : 131-138.
 - 9) 池上康男・桜井伸二・矢部京之助 (1991) DLT法. Japanese J. Sports Sci. 10 (3) : 191-195.
 - 10) Kanishevsky S (1984) A universal shot. Sov. Sports Rev. 19(4) : 207-208.
 - 11) Konstantinov O (1979) The training program for high level javelin throwers. Sov. Sports Rev. 14(3) : 130-134.
 - 12) 森本吉謙・村木征人 (2001) ボール重量が野球の投球におけるスピードと正確性に及ぼす影響. スポーツ方法学研究 14 (1) : 85-92.
 - 13) 森本吉謙・伊藤浩志・島田一志・川村卓・阿江通良・村木征人 (2003) ボール重量の増減が野球の投球運動に及ぼす影響とアシスティッドおよびレジスティッド・トレーニングとしての即時効果. スポーツ方法学研究 16 (1) : 13-26.
 - 14) 村木征人・阿江通良・宮下憲・伊藤信之 (1988) トウ・トレーニングの実践的応用と留意点. 昭和63年度日本体育協会スポーツ科学研究報告No.X「スプリントアシスティッド・トレーニングに関する研究」(第1報), pp.39-43.
 - 15) 村木征人・宮下憲・阿江通良・伊藤信之・森田正利 (1989) 等張性牽引トレーニングがスプリント・パフォーマンスに及ぼす影響—筑波大学研究班の研究経緯と研究成果の概要—. 平成元年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告No.VII「スプリントアシスティッド・トレーニングに関する研究」(第2報), pp.3-8.
 - 16) 村木征人 (1994) スポーツ・トレーニング理論. ブックハウス・エイチディー: 東京.
 - 17) 西藤宏司 (1975) 実験投擲学 (新体育講座第66巻, 大石三四郎・竹内虎士編) pp.121-129.
 - 18) Tancred B (1977) The effects of using a 'heavy' discus in training by novice U/15 year old schoolboys. Athletics coach 11(4) : 9-11.
 - 19) Vasiliev LA (1983) Use of different weights to develop specialized speed-strength. Sov. Sports Rev. 18(1) : 49-52.
 - 20) Wells RP and Winter DA (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: Human Locomotion I (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics) 1 : pp. 92-93.
 - 21) 山本大輔・伊藤章・田内健二・村上雅俊・淵本隆文・田邊智・遠藤俊典・竹迫寿・五味宏生 (2010) 円盤投げのキネマティクスの分析. 第11回世界陸上競技選手権大阪大会日本陸連バイオメカニクス研究班報告書 (『世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術』, (財) 日本陸上競技連盟編), pp.189-200.