

## 砲丸投げのバイオメカニクス

### — 第3回世界陸上競技選手権大会における投動作の三次元的分析 —

#### Biomechanics of shot put

#### — Three dimensional analysis of throwing motion in third IAAF world championship in athletics —

池上 康男\*      桜井 伸二\*  
岡本 敦\*\*      橋本 勲\*\*\*

Yasuo IKEGAMI\* , Shinji SAKURAI\* ,  
Atsushi OKAMOTO\*\* , Isao HASHIMOTO\*\*\*

The movements of the body and the put in the trial of the final event of shot put in third IAAF world championships in athletics in 1991 were analyzed from both kinematical and mechanical view points. Three dimensional film analysis technique (DLT method) was utilized to record and to analyze three dimensional movements of thrower's body and put. The results indicated that most dominant mechanical factor determining the performance in shot put was the initial velocity of the put at release even though there were little difference in throwing distance between throwers in the highest level event. Other mechanical factors such as angle of release and release height did not affect the throwing distance. All the mechanical parameters measured in throwing motion did not change between subjects except for direction of movement of C.G. and direction of force suggesting that the patterns of force or power exerted were very similar in these high level throwers. Although there existed a significant correlation between initial velocity and throwing distance no clear relationship was recognized between force or power exerted to put in throwing motion and throwing distance. This might be due to the variation of combination of mean power and duration time exerting power to put; one thrower exerted high power in short duration time and another low power in long duration time.

#### はじめに

砲丸投げは投げ出された砲丸の飛距離により争われる。リリース後の砲丸の軌跡は初速度やリリース角、リリース高といった初期条件によって決る。一般に、リリース時に投てき物が持つベクトルとしての速度は投げの動作およびそれに先行する予備動作の間に投てき物に加えられた力によって決る<sup>2,6)</sup>。今日、多くの選手が用いるオブライエン式投法では最初に後向き

の構えからグライドに入り、身体を回転させて投げの動作に入る。投げの動作においても、腰から上の上半身の捻りが使われる。また、グライドにおける身体の移動方向と、投げの動作において砲丸が加速されリリース後に飛行する方向とは必ずしも一致しない。このように身体の回転を伴った動きや異なる方向への並進運動を含む投動作の分析には三次元的な運動の記録が不可欠である。そこで、本研究では、1991年8月に東京で行われた第3回世界陸上競技選手権

\* 名古屋大学総合保健体育科学センター

\*\* ノートルダム女子大学

\*\*\* 中京女子大学

\* Research Center of Health, Physical Fitness and sports, Nagoya University

\*\* Notre Dame Women's College

\*\*\* Chukyo Women's University

大会の男子砲丸投げ決勝出場選手の投動作を三次元の映画撮影法によって記録し、一流選手の競技記録に影響を与える要因についてバイオメカニクスの観点から検討した。

## 方 法

### 1) 対 象

1991年8月31日に東京の国立霞ヶ丘競技場で行われた第3回世界陸上競技選手権大会男子砲丸投げ決勝における上位6名の選手の投てき試技を分析の対象とした。表1に対象とした選手の年齢、体格および自己最高記録を示した。

### 2) 記 録

競技場観客席の最上段の通路に2台の16mm高速度カメラ（フォトソニックス社製1-PL）を設置した。カメラの設置場所は投てきサークルのほぼ後方および、斜め後方であった。フェイズロック機構により2台のカメラのシャッターの回転を電氣的に同期させ、各選手のグライドからリリースに至る投動作を毎秒100コマの撮影速度で記録した。両カメラの光軸のなす角度は約60度、視野はリリースまでの選手の全動作、およびリリース後の砲丸の飛行が1m程度収まるように設定した。三次元のキャリブレーションのために、投てきサークルの中心を基準にあらかじめ計測されたフィールド上の複数の固定点に験者が順次キャリブレーション用のポールを垂直に立て、ポールに取り付けられた2箇のコントロールポイントを撮影した。

Table 1. Characteristics of subjects.

Subj.	Rank	Age	Height	Weight	Personal Record
GN	1	30	202	126	22.75
AN	2	28	189	113	20.86
NL	3	26	191	107	20.49
KL	4	21	193	112	20.37
BD	5	25	200	130	21.06
NK	6	24	189	122	21.35
Mean		26.0	195.0	117.6	21.11
S.D.		2.9	5.2	8.2	0.79

### 3) 分 析

2台のカメラから得られたフィルムをデジタイザー上に投影することにより、コントロールポイントのフィルム面上での座標を求めた。同様に、記録された投動作中の砲丸を含む身体各部位のフィルム面上での座標を各コマについて計測した。得られたコントロールポイントのフィルム面上での座標と実空間での座標値を用いて、DLT法<sup>1,4)</sup>によって2本のフィルムから得られた座標値を合成し、砲丸および身体各部位の実空間上での三次元座標を求めた。得られた三次元座標から計算によりリリース時の初速度の三次元ベクトル、リリース高、投動作中の重心位置等を求めた。重心の計算には松井の重心係数<sup>5)</sup>を用いた。また、分析データに混入したノイズを除去するためにカットオフ周波数10Hzの双方向バターワースタイプデジタルフィルターを用いた<sup>7)</sup>。分析は最も記録の良かった試技について行ったが、フィルム交換等の関係で、6名中2名は2番目、1名は3番目の記録の試技を分析した（表2）。

## 結 果 と 考 察

### 1) 選手の体格

表1に各選手の身長や体重が示されている。身長は最も低い選手でも189cm、最高で202cmと極めて長身であった。さらに、体重では平均でも120kg近くあり、世界の一流選手が大柄であることを示している。

### 2) 投げの動作

図1に真上から見たグライドからリリース後に至る投げの動作を示した。図は身体各部および砲丸の三次元の位置ベクトルを水平面上に投影しすることにより得たものである。ステイックピクチャーは右手、右肘、右肩、左肩、左肘、左手の順に結んだものであり、砲丸（○印）、および重心（×印）の軌跡とともに示した。図の上は1位のGunthor選手、下は3位のNilsen選手のものである。グライドからリリースに至るまで、重心の移動軌跡は比較的直線的であるが、砲丸は投げの構えから腕の突き出しの直前

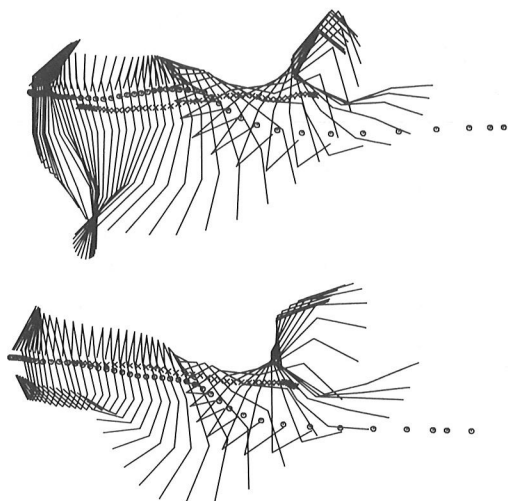


Fig. 1. Top view of throwers body, put (○) and the center of gravity of throwers body (×) for two throwers (upper : Gunthor, lower Nilsen). Stick pictures are drawn by connecting the body points in the following order ; hand, elbow, shoulder in the right hand side and shoulder, elbow, hand in the left hand side.

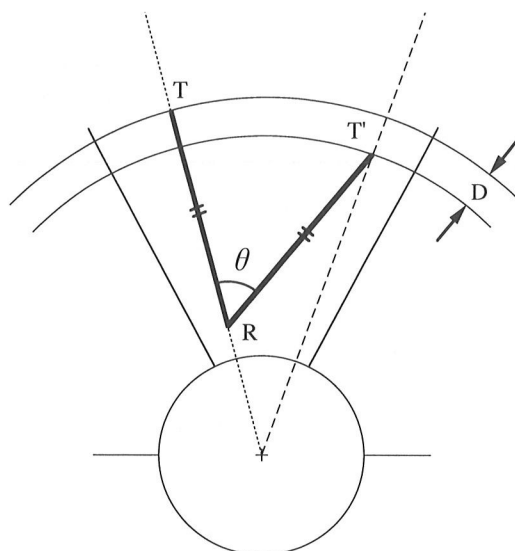


Fig. 2. Deviation angle ( $\theta$ ). Deviation angle is defined as the angle between the direction of the trajectory of put and the line passing the center of the circle and release point (see text).

Table 2. Best record and record in analyzed trial, initial conditions at release for each subjects.

Rank		1	2	3	4	5	6		
Subject		GN	AN	NL	KL	BD	NK	Mean	S.D.
Best Record	[m]	21.67	20.81	20.75	20.34	20.10	19.98	20.61	0.56
Analyzed Record	[m]	21.67	20.75	20.75	20.14	20.10	19.93	20.56	0.59
Initial Velocity	[m/s]	14.17	13.98	13.73	13.81	13.55	13.39	13.77	0.26
- Horizontal	[m/s]	11.31	11.19	10.69	10.77	10.56	9.87	10.73	0.47
- Vertical	[m/s]	8.53	8.38	8.62	8.65	8.49	9.05	8.62	0.21
Angle of Release	[deg]	37.0	37.0	38.9	38.8	38.8	42.5	38.8	1.8
Release Direction	[deg]	4.5	-15.7	1.7	-6.6	-6.5	0.2	-3.7	6.7
Release Height	[m]	2.29	2.21	2.24	2.32	2.29	2.22	2.26	0.04
Release Length	[cm]	15	15	8	15	1	-4	8.2	7.6
Deviation Angle	[deg]	4.4	14.4	18.1	11.9	4.4	15.0	11.4	5.3

まで右側に大きく湾曲していることが観察された。その後の砲丸の動きは直線的であったが、図に示したようにリリース後も含め、その方向が重心の移動方向と平行になる試技と、重心の移動方向とリリース後の砲丸の向きが大きく異なる試技が見られた。グライドによって砲丸が得る運動量の向きは重心の移動の向きとほぼ同じとなるため、リリース後の砲丸の運動量の向

きがこれと大きく異なることはグライド中に砲丸に加えられた力の向きがグライド中の砲丸の移動方向と異なっていることを示しているものであり、不利な要因ではないかと考えられた。

### 3) リリース時の初期条件

表2に6名の選手の競技における最高記録、分析の対象とした試技の記録(分析記録)およびリリース時の諸量を示した。分析記録と最高

記録の差は最大でも20cmであり、最高記録に対する割合は1%以下であった。表に、初速度、水平および垂直初速度（リリース時の砲丸の初速度の三次元ベクトルの絶対値、水平および垂直成分）をそれぞれ示した。また、リリース角（Angle of Release）は初速度ベクトルと水平面とのなす角度、投てき方向（Release Direction）は初速度ベクトルを含む垂直面と投てき場の扇形の中心線とのなす角度として求めたものである。これらの諸量の中で、初速度には分析記録との間に  $r = 0.875$  ( $p < 0.05$ ) の相関が見られた。このことは、記録差が最大でも1.7m（約8%）しかない高レベルの選手のグループにおいても初速度が記録を決定する上で極めて重要な要因であることを示している。リリース高はリリース時の砲丸のフィールド面からの高さ、また、リリース長（Release Length）はリリース位置と投てきサークルの中心との距離からサークルの半径を差し引いたものである。リリース角およびリリース高は各選手とも似通った値であり、ばらつきも少なかった。しかし、記録に直接影響するリリース長では、15～4cmと個人差の大きいものであった。角偏差（Deviation Angle）は水平面上のリリース位置とサークルの中心を結んだ線分と初速度ベクトルの水平成分とのなす角（図2の $\theta$ ）であり、この角度の値が0でない場合、砲丸の軌跡はサークルの中心を通らず、この値が大きいと実際の飛距離と計測される記録との差が大きくなる。すなわち、図2でリリース後の砲丸の実飛距離が同じであっても、RTで示されるように砲丸の軌跡がサークルの中心を通る場合と比べ、RT'で示されるように砲丸の軌跡がサークルの中心を通らない場合は競技規則に則って計測される記録はDで示した距離だけ短くなる。Nilsen選手の場合のように角偏差が20度近くになるとその差は5cm程度となる。1位のGunthor選手は、リリース長は大きく、角度偏差は小さく押えられていた。

#### 4) 投げの動作における砲丸の加速

グライドの後の両足着地からリリースに至るまでの投げの動作における砲丸、肘、肩の速度

変化を1位のGunthorと6位のNikolayevについて図3に示した。図において、速度の水平および垂直成分は、それぞれ、速度の三次元ベクトルの水平および垂直成分として求めたものである。それぞれの加速のパターンは2人の選手で基本的に似ており、他の選手についても類似の結果が得られた。水平、垂直、絶対値のいずれの場合も投げの動作の大半の部分で肘の速度が砲丸の速度を上回っており、リリース直前で逆転し砲丸の速度が上回っていた。これは、二次元的な方法で投げの動作中のエネルギー発揮について調べた橋本ら<sup>3)</sup>の結果と異なるものであった。橋本らの研究では速度の水平成分はサークルの真横から見た速度となっているため、肩や肘の回転が伴うと速度が過少に評価される可能性がある。すなわち、速度の水平成分のうち、投方向に垂直な成分が大きいときに二次元的に測定した速度と実際の速度が異なってくるものと思われる。いずれの選手においても砲丸の速度が肘の速度を越えた後、加速される量は2割程度であった。

#### 5) 投げの動作中に砲丸に加えられた力とパワー

図4および5にグライドの開始からリリースに至るまでの間に手から砲丸に加えられた力とパワーの変化を示した。力は支持足のけり出しによって一旦増加するが、着地前に減少していた。この減少は力の垂直成分で特に著しく、わずかに負となる例もみられた。これはグライドの間の空中動作では身体の運動が自由落下となり、砲丸には重力以外の力がほとんど加わらない状態が生じるためと考えられる。パワーについてみると、力に比べ、幾分位相のずれはみられるものの、支持足のけり出しによるとみられるパワーの増加があり、その後力の垂直成分と同様に0あるいは負の値にまで減少していた。グライドに続く両足着地から始まる投げの動作によってパワーは急激に増加していた。

表3に投げの動作中の力学的諸量をグライド中の重心の水平速度の最大値（Velocity of C.G.）と共に示した。力およびパワーのピーク値について橋本ら<sup>3)</sup>の報告と比較してみる

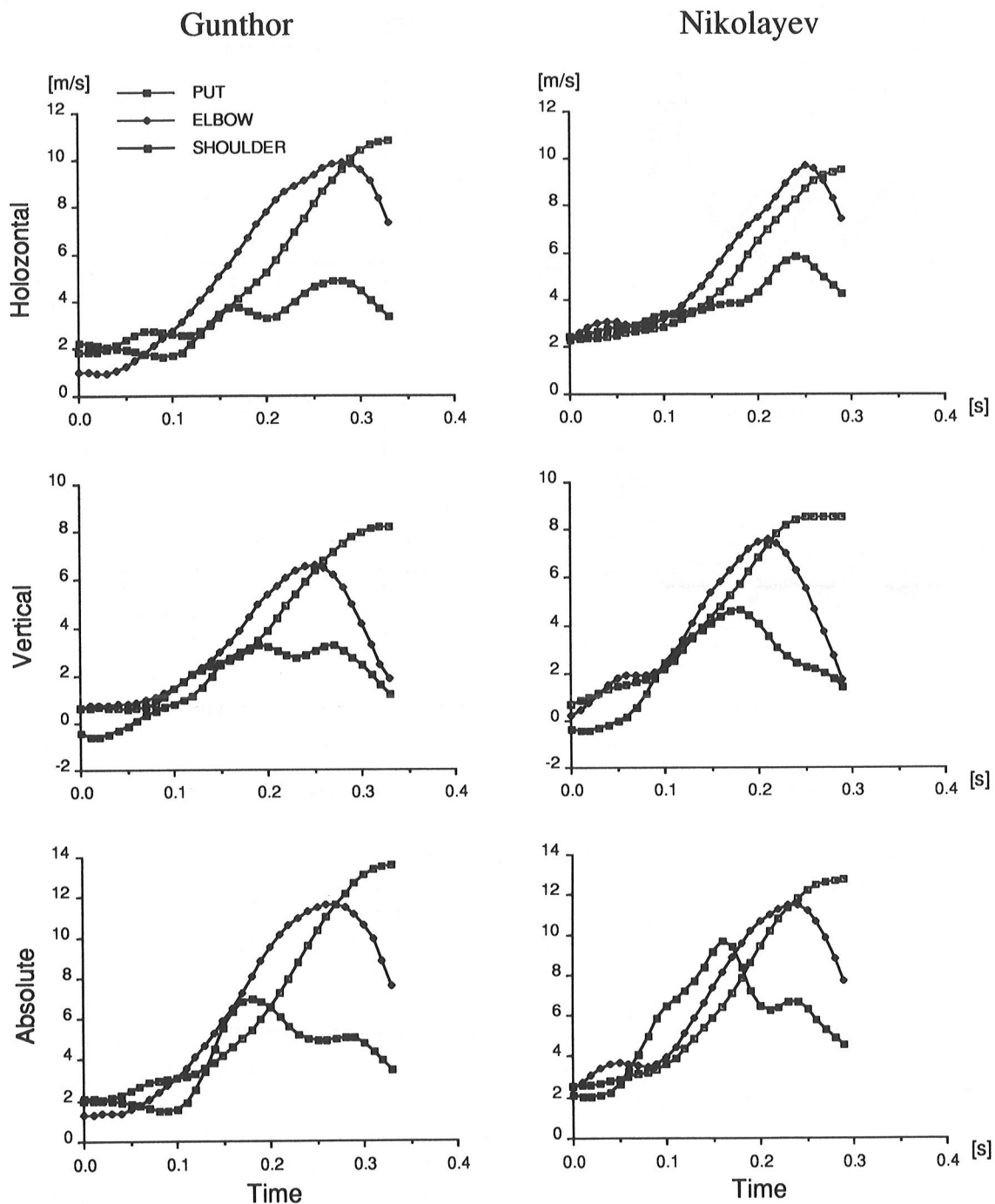


Fig. 3. The changes in velocity of put during throwing motion. Horizontal (top), vertical (middle) components and absolute value (bottom) of put, elbow and shoulder are shown for two throwers (left : Gunthor, right : Nikolayev).

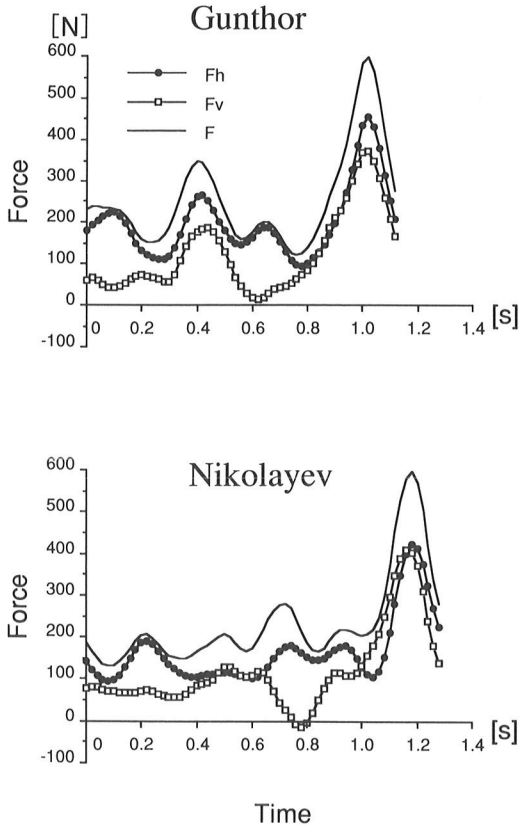


Fig. 4. Force exerted to put during glide phase and throwing motion for two throwers (upper : Gunthor, lower : Nikolayev).

と、力の値はほぼ同程度であったが、パワーにおいては1500W以上の差がみられた。橋本らの研究で対象とされたのは、日本国内の大学レベルでの優秀選手およびそれ以下のレベルの選手である。このことから、世界の一流選手と国内レベルの選手との違いは、発揮する力の大きさではなく、そのパワーにあるといえるだろう。いかえれば、本研究で対象とした選手では、より速い動作での力の発揮能力が優れていることになり、筋収縮のレベルで考えれば、より高い筋収縮速度で同程度の力の発揮ができることを示唆している。

グライド中の重心の最大速度、両足着地からリリースまでの投げの動作に要した時間、最大および平均のパワーと力、さらに力の上下方向

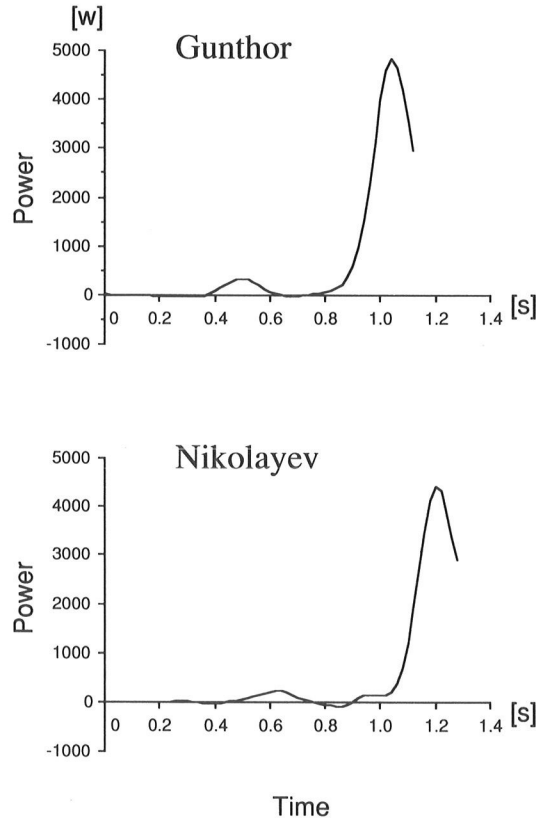


Fig. 5. Power exerted to put during glide phase and throwing motion for two throwers (upper : Gunthor, lower : Nikolayev).

の向き (Inclination of Force) はいずれもばらつきが少なく、平均値に対する割合は最大でも力の垂直成分の6.3%に過ぎない。これらの結果は、投げの動作における力やパワーが対象とした6名の選手でよく似たパターンで発揮されていることを示している。このことは、表2に示したように、記録のばらつきあるいは初速度のばらつきが3%にも満たないことから当然の結果といえるだろう。しかし、記録はリリース時の初速度によってほぼ決定されることから、投げの動作でリリースに至るまでの間に砲丸にどれだけのエネルギーを与えられるか、すなわち、投げの動作中砲丸になされた仕事量が記録に直接影響を与える要因であると言える。表3の平均のパワーは投げの動作前とリリース時に

Table 3 Maximum horizontal velocity in gliding phase and mechanical parameters throwing motion.

Rank		1	2	3	4	5	6		
Subject		GN	AN	NL	KL	BD	NK	Mean	S.D.
Velocity of C.G.	[m/s]	2.22	2.11	2.36	2.35	2.32	2.19	2.26	0.09
Duration Time	[s]	0.33	0.31	0.27	0.29	0.31	0.28	0.30	0.02
Maximum Power	[W]	4829	4561	4633	4247	4373	4422	4511	189
Average Power	[W]	2245	2281	2510	2381	2141	2334	2315	115
Maximum Force	[N]	596	564	577	595	560	595	581	15
Average Force	[N]	310	316	345	319	306	331	321	13
- horizontal	[N]	198	199	206	210	185	184	197	10
- vertical	[N]	238	246	277	240	243	275	253	16
Inclination of Force	[deg]	50.2	51.0	53.4	48.8	52.7	56.2	52.0	2.4
Direction of Force	[deg]	4.4	-17.7	2.8	-5.9	-11.1	2.4	-4.2	8.2
Direction of C.G.	[deg]	4.7	4.8	-3.6	-3.0	4.7	1.5	1.5	3.6
Difference F - C.G.	[deg]	0.3	22.5	6.3	3.0	15.8	0.9	8.1	8.3

砲丸が持つ力学的エネルギーの差を投げの動作時間で除したものである。平均のパワー、動作時間のいずれにも記録あるいは初速度との間に顕著な関係はみられない。このことは、Gunthorにみられるように、平均のパワーは小さいが投げの動作時間が長い場合、結果として、多くの仕事量を得るタイプと、Nilsenのように、平均パワーは大きい但し砲丸の加速時間が短いタイプ等、動作時間と発揮パワーの組み合わせが選手間で異なっていることを示している。

表3に示した、力の水平方向の向き (Direction of Force)、重心の移動方向 (Direction of C.G.)、両者の差 (Difference F-C.G.) については選手の間で大きな変動がみられた。力や重心の移動方向が選手によって異なるのは、砲丸投げの場合、投てき場は左右に20度の広がりを持つ扇形となっているため、選手はこの範囲内で自由に投てき方向を選べるためであろう。しかし、図1にも示したように、重心の移動方向と投げの動作中に砲丸に加えられる力の方向が大きく異なることは砲丸の加速に関して力学的には不利な要因となるであろう。

## ま と め

第3回世界陸上競技選手権大会に出場した砲

丸投げ一流選手の投動作を三次元の映像記録法を用いて分析し、以下のような結果が得られた。

1) 上位6名の選手の記録の幅は極めて小さいものであったが、記録と初速度の間には有意な関係が認められ、このレベルの選手においても初速度が競技成績を決定する重要な要因であることが示唆された。

2) 投げの動作中の砲丸や肘、肩の速度変化、ならびに、砲丸に加えられた力やパワーの平均値およびその変化のパターンは6名の選手で似通っていることが明らかとなった。

3) 日本の大学選手と比較すると、投げの動作で発揮される力は同程度であるが、パワーには大きな差がみられた。

4) リリース時の初速度の差を生み出す要因として、パワーの大きさと投げの動作に要した時間である動作時間の組み合わせが異なることが明らかとなった。

5) グライドにおける身体重心の移動方向と投げの方向が異なる選手が存在し、力学的に不利であると考えられた。

本研究は日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究特別班の研究活動の一部である。

文 献

- 1) Abdel-Aziz, Y. I. and H. M. Karara : Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- 2) 橋本勲、池上康男、桜井伸二、安藤好郎、室伏重信：砲丸投げの身体運動学的研究. 中京女子大学紀要、21:51-58, 1987.
- 3) 橋本勲、池上康男、桜井伸二、室伏重信、安藤好郎：砲丸投げにおける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－. Jpn. J. Sports Sci., 10:73-79, 1991
- 4) 池上康男：写真による運動の3次元解析法. Jpn. J. Sports Sci., 2:163-170, 1983
- 5) 松井秀治：運動と身体の重心. 体育の科学社、東京、1958.
- 6) 三浦望慶、橋本勲：投げにおける方向と初速度と重量と. 体育の科学、30:473-477, 1981.
- 7) 桜井伸二、池上康男：フィルムデータの平滑化法について. 総合保健体育科学、8:95-102, 1985.

(1992年12月7日受付)