

# 砲丸投げの力学的研究

加 賀 勝

## 1. はじめに

砲丸投げは、直径2.135メートルのサークル内から砲丸を押し出すように投げ、その飛距離を競うものである。砲丸の重さは、男子7.257キログラム以上、女子、4キログラム以上と規定されている、

砲丸の飛距離は、主として、砲丸が手から離れる瞬間の速度と、投げ出される角度および、そのときの高さによって決定される。砲丸投げの投法には、オブライエン投法や回転投法があるが、それらの投法のポイントも、小さなサークル内で、いかに砲丸の速度をあげ、最適な角度で投げ出すかであると言えよう。

砲丸の速度を大きくするためには、プライドを含む投てきフォームの正確さと、筋力や瞬発力などの体力的要素が必要と考えられる。正確なフォームや体力的要素の獲得には、繰り返しの練習や筋力トレーニングが不可欠である。また、投げ出す角度については、砲丸の速度や投げ出す高さにより、微妙に調節を行なわなければならない。

本研究では、砲丸が投げ出されるときに速度や角度および位置などを映像分析により求め、これらを用いてコンピュータシュミレーションなどを行い、砲丸投げの指導場面での基礎的資料を得ようとした。

## 2. 方 法

図1に示すように、砲丸投げを被験者の右側方から30フレーム/秒のビデオカメラにより撮影した。カメラの光軸と垂直に交わる線をサークルの中心から投てき方向に引き、被

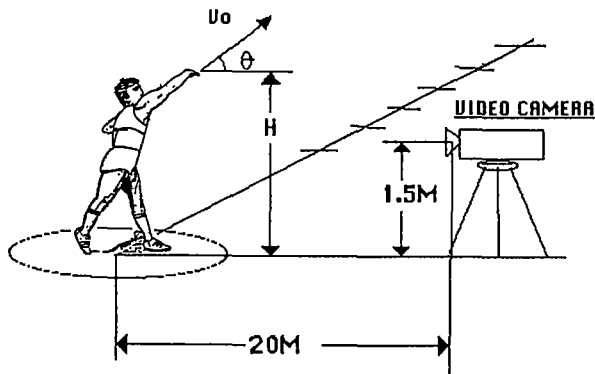


図1 実験の概略

験者にはその直線方向に投げることを指示した。ビデオカメラは、サークルの中心から20メートルの位置に三脚により設置し、レンズ中心高は、地上1.5メートルとした。また、ビデオカメラ本体は、水準器により水平に保った。

表1 被験者の身長・体重・年齢

被験者(女)	身長 (cm)	体重 (kg)	年齢	被験者(男)	身長 (cm)	体重 (kg)	年齢
Y・S	163.0	59.5	22	M・K	178.5	76.0	28
M・O	168.5	50.0	22	Y・O	168.0	58.0	22
H・K	158.0	52.0	21	T・Y	168.0	61.0	22
A・K	163.0	58.0	20	T・Y	180.0	74.0	22
K・M	156.0	54.0	22	T・I	162.0	56.0	22
K・S	153.0	48.0	21	K・O	166.7	55.0	21
A・K	158.0	52.0	21	T・O	173.0	62.0	20
K・H	152.0	45.0	19	T・H	175.0	73.0	24
M・E	162.0	53.0	19	A・M	171.0	80.0	22
Y・T	157.0	58.0	20	K・N	164.0	55.0	22
N・K	164.0	58.0	19	Y・Y	175.0	71.0	21
M・S	158.0	53.0	19	S・K	168.0	58.0	21
M・A	162.0	53.0	20	S・A	167.0	58.0	19
Y・T	167.0	55.0	20	S・S	172.0	68.0	32
K・M	158.0	46.0	19	M・M	175.0	60.0	19

本研究に用いた被験者は、体育を専攻する大学生などを中心とする男女、各々15名ずつとした。各被験者の身長・体重・年齢は表1に示した。この内、男子1名、女子2名は陸上競技部に所属し、投てきを専門とする者である。また、砲丸は、全被験者とも、4キログラムの女子競技用を使用し、各被験者毎に2投を行なわせた。

ビデオ画像からは、スーパーインポーズ機能を有するマイクロ・コンピュータにより、砲丸の離手直前から離手直後までの座標を読み込んだ。

離手直前と直後の1/15秒についての位置座標から、砲丸の離手時の高さ(離手高)、離手時のサークル端の鉛直面との距離(離手位置)、離手時の水平とのなす角度(投てき角度)、離手時の速度(初速度)を算出した。

砲丸投げにおいては、空気抵抗は無視することができると考えられるので、投げ出された砲丸(質量,  $m$ )には、鉛直下向きの重力( $g$ )だけが加わると考えられる。水平方向を $x$ 、鉛直方向を $y$ とすると、その運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= 0 \\ m\ddot{y} &= -mg \end{aligned} \right\} (1)$$

である。これを、初期条件、 $t=0$  で  $\dot{x}=V_0 \cos \theta$ 、 $\dot{y}=V_0 \sin \theta$  により積分し、

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{y} &= V_0 \sin \theta - gt \end{aligned} \right\} (2)$$

さらに、初期条件、 $t=0$  で  $x=y=0$  として積分すると、

$$\left. \begin{aligned} x &= V_0 t \cos \theta \\ y &= V_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \right\} (3)$$

となる。ここで、 $V_0$ は砲丸の初速度、 $\theta$ は投てき角度である。実際には、砲丸が投げだされる時には、ある高さを持っているので、砲丸の離手高を  $H$  とすると、その飛距離  $l$  は、

$$l = \frac{1}{g} V_0 \cos \theta (V_0 \sin \theta + \sqrt{(V_0 \sin \theta)^2 + 2gH}) \quad \text{---(4)}$$

となり、砲丸の離手高、初速度、投てき角度がわかれば、飛距離が算出されることがわかる。そこで、ビデオ画像から得られるこれらのデータを(4)式に代入することで算出される投てき距離に離手位置を加えた距離と、実際に測定した投てき距離を比較することにより、ビデオからのデータについて、その妥当性の検討を行うことにした。

さらに、(3)式から  $t$  を消去し、砲丸の包絡線の方程式を求めると、

$$y = \frac{V_0^2}{2g} - \frac{gx^2}{2V_0^2} \quad \text{---(5)}$$

となる。これを  $x$  について解けば

$$x = \sqrt{\frac{2V_0^2}{g} - \left(\frac{V_0^2}{2g} - y\right)} \quad \text{---(6)}$$

である。この式から、砲丸の離手高と初速により、最大投てき距離が算出できることがわかる。また、算出された最大投てき距離から、最適投てき角度が

$$\tan \theta = \frac{V_0^2}{gx} \quad \text{---(7)}$$

として求められることになる。

### 3. 結果と考察

本実験における各被験者の投てき距離、ビデオ画像による砲丸の初速度・投てき角度・離手高、(4)式によりシュミレーションした投てき距離に離手位置を加えた距離(シュミレーションによる投てき距離)を、表2、表3に示した。

表2の女子被験者の第1投目標平均投てき距離は5.50メートル、シュミレーションにより算出した平均値は5.47メートル、第2投目平均投てき距離は6.04メートル、シュミレーションでは6.18メートル。また、表3の男子被験者の第1投目平均投てき距離は9.68メートル、シュミレーションにより算出した平均値は9.56メートル、第2投目平均投てき距離は10.0メートル、シュミレーションでは9.90メートルであった。このように、実際の測定による投てき距離と、シュミレーションによる投てき距離の誤差は、全体で5%以内(4.56%)であり、ビデオ撮影することにより得られたデータは、砲丸投げのシュミレーションをするのに妥当な値であると考えられた。

実測された投てき距離は、男女共に第1投目より第2投目の記録が向上する傾向が見られた。1投目と2投目の間には、投てき距離についてのフィードバックは与えたが、投てき角度やフォームについての指導は行なわなかったため、被験者の各々が投てき距離を大

表2 女子被験者の(A)第1投目の投てき距離, (A)'シミュレーションによる第1投目の投てき距離  
(A)第2投目の投てき距離, (B)'シミュレーションによる第2投目の投てき距離, (Vo)砲丸の初速度,  
(D)投てき角度, (H)離手高

被験者(女)	(A)	(A)'	(Vo1)	(D1)	(H)	(B)	(B)'	(Vo2)	(D2)	(H)
	(m)	(m)	(m/s)	(°)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(°)	(m)
Y・S	7.13	6.96	7.25	32.1	1.87	7.33	7.82	7.72	30.0	1.83
M・O	6.07	6.24	6.59	33.6	1.93	6.25	6.78	7.19	28.5	1.79
H・K	4.65	4.96	6.14	44.3	1.79	5.44	4.90	6.14	44.3	1.76
A・K	6.14	5.87	6.51	34.0	1.89	6.62	6.70	7.11	37.1	1.90
K・M	5.01	5.21	6.02	35.0	1.86	5.52	5.47	6.27	38.0	1.86
K・S	5.17	5.30	6.27	28.6	1.84	5.82	5.64	6.39	32.3	1.84
A・K	6.12	5.85	6.51	33.9	1.82	6.15	5.97	6.52	29.5	1.93
K・H	5.08	4.92	5.82	33.8	1.90	5.01	4.72	5.72	36.9	1.86
M・E	5.80	5.90	6.55	31.6	1.80	6.47	7.00	7.35	27.7	1.79
Y・T	5.70	5.33	6.34	42.6	1.97	6.37	6.14	6.97	42.7	1.86
N・K	3.09	3.25	4.22	23.8	2.02	5.71	5.53	6.36	30.3	1.88
M・S	5.49	5.40	6.58	21.2	1.56	5.94	5.80	6.47	32.1	1.77
M・A	6.03	6.11	6.82	26.1	1.59	6.20	6.68	7.26	26.5	1.62
Y・T	5.69	5.86	6.51	34.0	1.89	6.03	6.43	6.75	32.7	1.94
K・M	5.34	4.97	6.06	39.6	1.69	5.80	6.07	6.76	37.0	1.79
mean	5.50	5.47	6.279	32.95	1.828	6.044	6.177	6.732	33.71	1.828
s.d.	0.899	0.833	0.668	6.352	0.129	0.554	0.82	0.535	5.397	0.08

表3 男子被験者の(A)第1投目の投てき距離, (A)'シミュレーションによる第1投目の投てき距離,  
(B)第2投目の投てき距離, (B)'シミュレーションによる第2投目の投てき距離, (Vo)砲丸の初速度,  
(D)投てき角度, (H)離手高と全被験者の平均値及びS.D.

被験者(男)	(A)	(A)'	(Vo1)	(D1)	(H)	(B)	(B)'	(Vo2)	(D2)	(H)
	(m)	(m)	(m/s)	(°)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(°)	(m)
M・K	9.38	9.87	8.90	40.5	2.14	10.02	9.67	9.08	45.2	1.95
Y・O	9.10	8.90	8.37	36.0	1.94	10.50	10.40	9.15	35.9	1.96
T・Y	10.31	9.77	9.00	36.5	1.77	8.95	9.55	8.84	33.5	1.82
T・Y	10.44	10.25	9.20	44.1	2.14	11.00	8.98	8.63	46.5	2.20
T・I	9.29	9.45	9.05	41.7	1.86	9.20	9.12	8.95	46.0	2.04
K・O	8.79	8.47	8.44	47.8	2.10	9.03	9.56	8.72	37.8	2.08
T・O	8.84	8.66	8.34	34.9	1.94	9.41	9.46	8.78	37.7	1.98
T・H	9.14	9.15	8.63	40.2	1.86	10.11	10.24	9.05	38.0	2.03
A・M	10.91	11.03	9.74	39.6	1.87	10.40	10.40	9.42	39.5	1.90
K・N	9.43	8.09	8.10	45.6	1.95	10.34	8.18	8.04	41.0	1.86
Y・Y	11.64	10.90	9.47	41.2	1.94	13.13	13.56	10.59	39.1	2.03
S・K	8.95	9.37	8.73	36.1	1.85	8.53	8.89	8.39	36.2	1.95
S・A	8.34	8.64	8.59	32.7	1.69	8.11	8.73	8.33	30.7	1.91
S・S	11.00	11.32	9.82	42.6	1.86	11.39	11.86	9.96	38.7	2.01
mean	9.68	9.562	8.884	39.96	1.922	10.009	9.90	8.995	38.99	1.980
s.d.	0.993	1.025	0.529	4.326	0.132	1.3017	1.391	0.662	4.547	0.097
MEAN	7.5196	7.448	7.537	36.334	1.873	7.958	7.974	7.824	36.255	1.9013
S.D.	2.321	2.767	1.4518	6.4495	0.1365	2.2371	2.1953	1.2925	5.601	0.1162

きくするように、投てき角度やフォームに工夫をした結果であると考えられる。

尚、男子被験者15名のうち1名が左利きであったため、ビデオ画像からのデータを得ることができなかったのが割愛した。

表4 (D1) (D2)投てき角度, (D1)' (D2)'最適投てき角度,  
(A)'シミュレーションによる第1投目の投てき距離, (B)'シミュレーションによる第2投目の最大投てき距離  
(C1)シミュレーションによる第1投目の最大投てき距離, (C2)シミュレーションによる第2投目の最大投てき距離

被験者(女)	(D1)-(D1)'	(D2)-(D2)'	(A)'-(C1)	(B)'-(C2)	被験者(男)	(D1)-(D1)'	(D2)-(D2)'	(A)'-(C1)	(B)'-(C2)
	(°)	(°)	(m)	(m)		(°)	(°)	(m)	(m)
Y・S	- 5.2	- 7.2	0.08	0.21	M・K	1.2	4.6	0.01	0.24
M・O	- 1.8	- 8.6	0.01	0.21	Y・O	- 2.8	- 3.4	0.00	0.06
H・K	7.3	- 7.0	0.14	0.15	T・Y	- 3.6	- 5.9	0.05	0.15
A・K	- 2.4	- 0.5	0.01	0.00	T・Y	4.1	7.0	0.11	0.26
K・M	- 0.4	- 1.8	0.00	0.01	T・I	0.2	4.7	0.01	0.19
K・S	- 8.0	- 4.0	0.10	0.03	K・O	8.3	- 1.2	0.34	0.00
A・K	- 2.5	- 6.1	0.01	0.09	T・O	- 4.3	- 2.0	0.06	0.01
K・H	- 1.2	1.7	0.01	0.01	T・H	0.5	- 1.2	0.00	0.01
M・E	- 4.7	- 9.5	0.05	0.27	A・M	- 1.7	- 1.5	0.00	0.00
Y・T	5.6	4.2	0.10	0.08	K・N	6.6	2.2	0.18	0.02
N・K	- 5.3	- 6.2	0.03	0.06	Y・Y	1.2	- 1.0	0.01	0.02
M・S	-15.6	- 4.1	0.50	0.04	S・K	- 3.4	- 2.7	0.04	0.02
M・A	-10.4	10.9	0.30	0.35	S・A	- 7.8	- 7.6	0.18	0.24
Y・T	- 2.4	- 3.0	0.01	0.03	S・S	1.6	- 1.8	0.02	0.04
K・M	2.8	- 0.6	0.03	0.00					

表4は(7)式から求められる最適角度と実際の投てき角度の差, および, (6)式から算出した最大投てき距離とシミュレーションによる投てき距離との差を示している。

投てき角度は, 女子被験者で, 第1投目, 第2投目共に15名中12名が最適投てき角度より小さな角度で投てきを行っている。これは, 女子の場合, 学校体育などで投てき運動を実施する機会が少ないため, 砲丸投げそのものに不慣れであることが理由の1つと考えられる。また, 女子は表2でも見られたように, 砲丸に与える初速度が男子よりも小さいことから, 筋力が比較的弱く, そのことが角度を大きくできない要因となっているのではないかと考えられる。

角度を最適にして投てきを行った場合, 女子被験者で最大0.5メートル, 男子被験者で最大0.34メートル, 記録向上が予測された。投てき距離が0.5メートルのびる被験者の場合, 角度を変えずに初速をどのくらい大きくすれば0.5メートル記録が向上するかを, (5)式から算出したところ, 0.5 m/sであった。つまり, この試技では, 角度を最適にすることは, 砲丸の初速を0.5 m/sだけ大きくすることに相当することになる。

表5は, 砲丸の離手時における位置と, 投てき方向のサークル端の鉛直面との距離を示している。表中の- (マイナス) は, 砲丸の離手時の位置が, 投てき方向のサークル端より内側にあり, 投てき距離についての損失距離を示している。損失距離の最大は, 女子被験者で0.335メートル, 男子被験者で0.689メートルであった。この損失距離をできるだけ小さくし, さらに, サークル端より投てき方向側で離手するようにすることは, 初速度を大きくしたり, 最適角度に近づけて投てきすることに比べ, 簡単であると考えられるが, 指導場面などでは, 意外と見のがされ易いと思われる。

これらのことから, 砲丸投げでは2.135メートルのサークルを十分に使うことを指導した上で, 砲丸の初速が大きくなるようにグライドを含むフォームを習得させ, また, 特に筋力の弱い女子は, 投てき角度を正確に習得させるようにすべきであると考えられた。

表5 (L)サークル端からの距離

被験者(女)	(L1)	(L2)	被験者(男)	(L1)	(L2)
	(m)	(m)		(m)	(m)
Y・S	0.046	0.326	M・K	-0.125	-0.372
M・O	0.186	0.143	Y・O	0.015	0.137
H・K	-0.232	-0.268	T・Y	-0.051	0.070
A・K	-0.043	-0.095	T・Y	-0.213	-0.314
K・M	-0.030	-0.085	T・I	-0.585	-0.689
K・S	-0.162	-0.049	K・O	-0.326	-0.046
A・K	-0.009	0.098	T・O	-0.113	-0.168
K・H	-0.079	-0.122	T・H	-0.122	0.061
M・E	0.043	0.186	A・M	-0.378	-0.390
Y・T	-0.046	0.171	K・N	-0.162	-0.061
N・K	0.009	-0.116	Y・Y	-0.003	0.268
M・S	0.134	0.061	S・K	-0.024	-0.006
M・A	0.268	0.226	S・A	-0.232	0.170
Y・T	-0.308	-0.335	S・S	-0.216	-0.101
K・M	-0.168	-0.137			

## 4. ま と め

砲丸投げを男女30名に対し、各々2投を実施させた。それを側方からビデオ撮影することにより、投てき角度、投てき高、投てき位置などのデータを得た。これらのデータおよび、これらのデータを用いてコンピュータ・シュミレーションを行ったところ、次のような結果を得た。

1. 多くの被験者で、投てき距離についてのフィードバック情報のみで、記録の向上が見られた。
2. 実測による投てき距離とコンピュータ・シュミレーションによる投てき距離の誤差は全体で5%未満であり、側方からのビデオ撮影により得られたデータにより、砲丸投げをほぼシュミレーションできると考えられた。
3. コンピュータ・シュミレーションにより、投てき角度を最適にした場合の投てき距離を算出したところ、実際に測定した投てき距離よりも、最大で0.5メートルの記録向上が予測された。
4. 女子被験者については、投てき角度がシュミレーションによる最適投てき角度より小さい傾向が見られた。
5. 砲丸の離手位置は、最大のもので、投てき方向のサークル端鉛直面よりも0.689メートル内側であった。

## 引用、参考文献

- 1) 陸上競技指導ハンドブック, 古藤高良, 大修館書店, 1975, pp. 186-204.
- 2) 写真と図解による陸上競技, 浅川正一, 古藤高良, 大修館書店, 1966, pp. 159-174.
- 3) 陸上競技の指導, 山本邦夫, 山井正己, 道和書院, 1971, pp. 185-202.
- 4) 陸上競技教室, 丸山吉五郎, 古藤高良, 佐々木秀幸, 1971, 大修館書店, pp. 189-200.
- 5) 陸上競技のコーチング(II)  
金原勇編, 大修館, 1976, pp. 269-332.
- 6) 高校生の陸上競技, 学国高体連陸上競技部編, 1981, 講談社, pp. 211-224.

(昭和61年11月15日受理)