

弾動臼砲の特性

(昭和34年6月17日 受理)

水島容二郎・日下部正夫

(東京工業試験所)

1. 序 言

弾動臼砲は1912年に Comev¹⁾ によつて發明され、W. Taylor, G. Morris²⁾ により改良されて以来、各国で威力測定用として採用されており、日本でも JIS 規格 K4810 に採用されている。弾動振子と異なる点は構造の外に薬量が $\frac{1}{10}$ 、即ち10gであること、推進物が砂でなく、一定した弾丸であることであつて、薬量の少いことは爆薬の実用条件より離れているために欠点となつてはいるが、この点以外は凡て有利である。当所に昭和31年9月に設置された弾動臼砲の諸特性を測定計算したので以下に述べる。

2. 構造及び静特性

本機の構造は周知の如く、ナイフニツチで支えられた全重量450kgの物理振子で、下端に臼砲を有し、これに爆薬10gを装填し、JIS規格では6号工業雷管で起爆させ、予め嵌りさせた、重量17.4kgの鋼製弾丸を水平方向に発射し、前方の緩衝物で受止める。一方臼砲を含む振子自体は後方にハネ上がるが、このときのフレの最大角度を讀取る。全体の構造を図1に示す。

弾丸発射時には臼砲は後方への力を受けるが、その着力点は臼砲の中心軸上にあると考えてよいから、支点とこの中心軸間の距離が打撃の能率の腕となる。布製巻尺と折尺で数回繰返し実測の結果3,00.23cmであつた*

一般に物理振子の打撃の中心は支点と重心を結ぶ直線上で相当単振子長さ h の点であるから、これは振動週期 T を測定して計算可能である。 T の測定は次の如くして行つた。無風の日を選んで戸外にある振子の側面に正対し、砲身の中央に白線で印をつけ、支点の支持棒の中心を基準点として、単弦振動と見做し得る程度の小さな角度即ち 4° 以下の振幅で自由振動をさせな

* 測定時の気温の差によるアルミニウム製懸垂棒の伸縮は無視できる。

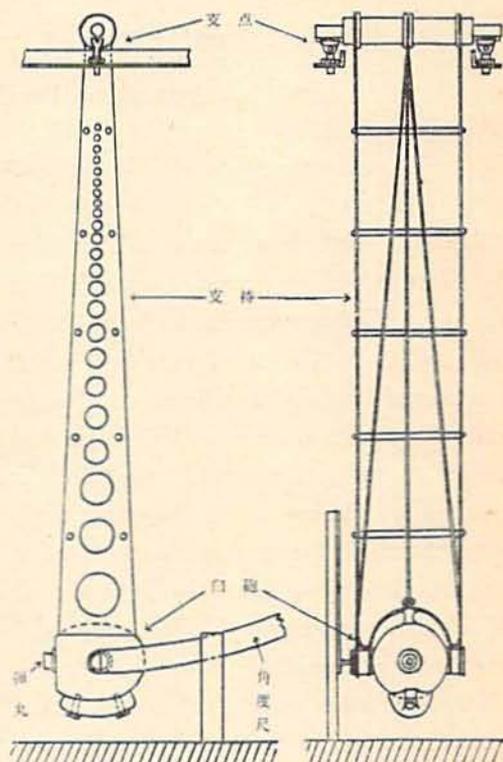


図 1

表 1 週期測定及び時計校正

測定番号	50週期のストップウォッチの読み	
1		2'52.0''
2		2'52.0''
3		2'52.0''
4		2'52.1''
測定番号	JJY 時間	ストップウォッチの読み
1	5'0''	4'59.8''
2	5'0''	4'59.8''

(測定気温 9.2 °C 曇)

から、白線が基準線を通る時刻を肉眼でストップウォッチにより測定する。測定結果は表1に示す。

使用したストップウォッチは直ちに自作の簡単な全波受信機によりJJYの標準時間信号(3MC)で校正した。標準信号の5分毎のアナウンスの直後の適当な秒信号を選び、ストップウォッチを遅期測定時と同様な姿勢、条件とし、5分の読みをとった。得た結果は表1の通りである。標準電波自身の誤差は $\pm 2 \times 10^{-8}$ であるが、空中伝播時のフェージングのため、 $\pm 10^{-7}$ に低下する。しかしこの実験のためには十分以上の精度である。

表1から補正した遅期 T として 3.443 ± 0.001 秒を得たので、相当単振子長 l を次式で求める。

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

白砲所在地平塚での重力の加速度 g の値は物理常数表(芝居吉編)所載の東京及び静岡の値の内挿値 979.784 cm/sec^2 を使用し、 l として $294.2 \pm 0.1 \text{ cm}$ を得た。この値は前述の支点と白砲中心軸間の距離 $a = 300.23 \text{ cm}$ に等しくない。これは設計不良と言い得る。これはTaylor¹⁾が可及的にこの両者を接近乃至一致せしめんとして改良した新製弾道白砲における不一致より、幾分悪い成績である。本機におけるこの不一致が、実際使用時に幾何の影響をフレの角度に及ぼすかは、各種の不一致の程度を有する弾動白砲を製作して、これらによる発射実験を行った上でなければ明瞭でない。本機の諸元をTaylorの新製弾動白砲のそれと共に表2に示す。

表2 弾動白砲諸元

	W. Taylor による新型	当所の白砲
振子部質量	332.5kg	450kg
弾丸質量	16.56kg	17.4kg
支持点・重心間距離	2.6944m	2.5668m
相当単振子長	3.0023m	2.9417m
支持点軸間距離	3.0480m	3.0023m
支持点の廻りの慣性モーメント		3397.8kgm ²
遅期		3.4428秒

尚本機を従来使用して来た経験のうち、再現性試験の結果を表3に示す。

この程度バラツキは何に起因するかを確証することは甚だ困難で、上記の不一致が要因の一つである可能性が充分考えられると云うに止まる。何れにしても重大な支障ではなく、実用上、一応満足できる結果を常に与えている。

表3 弾動白砲試験の再現性

(昭和32年7月27日)

T.N.T. 10g \pm 0.03g, 6号雷管にて起爆

番号	白砲のフレ θ
1	15°44'
2	15°46'
3	15°24'
4	15°24'
5	15°10'
6	15°30'
7	15°22'
8	15°18'
9	15°14'
10	15°24'

θ の平均: 15°25.8' 標準偏差: 11.1'

次に重要な特性の一つ、振子の重心と支点間の距離 h を求めるために、振子の支点から233.81cmの位置に質量71.8kgの鉛円錐を水平に附し、再び遅期 T' を測定した。測定結果を表4に示す。

表4 重錐を附した場合の遅期測定

測定番号	50遅期のストップウォッチの読み
1	2'49.9''
2	2'49.9''
3	2'49.8''
4	2'49.9''

測定番号	JJY時間	ストップウォッチの読み
1	5'0''	4'59.9''
2	10'0''	9'59.8''

(測定気温 4.4°C 小雪)

表に示すように、ストップウォッチも同時に校正した。以下から求めた遅期 T' は 3.399 ± 0.001 秒であり相当単振子長 l' は $286.7 \pm 0.1 \text{ cm}$ である。

質量 m の重錐を支点から a の所に附加することにより、支点重心間距離は h から h' に、質量は M から $M+m$ に変化するから、(M は振子部質量)

$$m/M = (h-h')/(h'-a) \quad (1)$$

また慣性モーメントの変化から

$$(M+m)k'^2 = M\{k^2 + (h-h')^2\} + m\{k'^2 + (h'-a)^2\} \quad (2)$$

k : 振子部の重心の廻りの慣性能率の腕の長さ

k' : 同上 但し重錘を附した場合のもの

k'' : 重錘自身の重心の廻りの慣性能率の腕の長さ

なお、 l, h, k , 間の関係式として次の2式が成立つ。

$$lh = k^2 + h^2 \quad (3)$$

$$l'h' = k'^2 + h'^2 \quad (4)$$

以上の4式から h を求めると、

$$h = \frac{m(al' - a^2 - k'^2)}{M(l - l')} \quad (5)$$

重錘は対称性がよいので、 k'' は簡単に計算され、 $k''^2 = 58.3 \text{ m}^2$ と求められる。実測値を(5)式に代入して

$$h = 264.2 \pm 6.1 \text{ cm}$$

が得られた。上記の誤差は M の測定誤差を考慮するときの最大誤差である。この h の値を用いると、振子の支点の廻りの慣性能率 $I = Mlh$ は $3497 \pm 61 \text{ kgm}^2$ となる。

3. 発射時の運動解析

発射時の各部の運動速度は、現在では電子管計数器を用いて精度よく測定出来るが、ここでは Wollensack 社製 Fastax 高速度カメラで撮影した 16mm フィルムによつて測定した。この場合は、運動の細部が分ると共に、運動の概況を全体的に観察出来て有利である。撮影速度は 6,000 コマ/秒程度。高速度カメラ専用 Tri-X フィルムを ASA 1,000 程度に増感現像して用いた。一例を写真 A 及び B に示す。

A は松ダイナマイトの場合で、真横から撮影したものである。B は T.N.T. の場合で、斜め前方から撮影したものである。T.N.T. の場合には爆煙のため、初期弾丸速度が測定出来ぬことが判る。装薬が電気雷管により爆発すると、まづ雷管脚痕孔からガスが噴出し、次いで弾丸が漸次加速され、押出されてくる。このとき砲と弾丸との間隙よりのガス洩れは殆んど認められない。弾丸の後面が砲口を離れると直ちに大量のガスが側方に噴出し、薬種によつてこれが空気と混合し二次燃焼をする。弾丸は水平方向に殆んど一定速度で安定に射出されている。

真横から撮影したネガフィルムで 1/1,000mm まで測定できる顕微鏡を用い、固定基準線から弾丸及び砲までの距離を測定し、これらの時間変化を図示した。

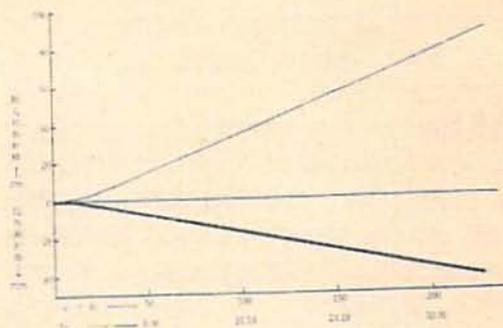


図2 黒色火薬の場合の弾丸及び砲の移動距離

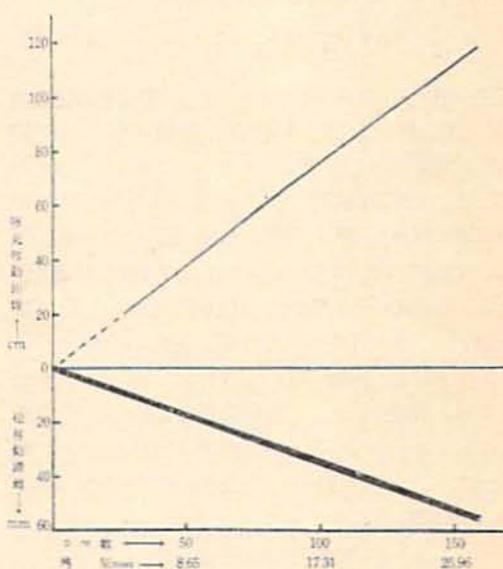


図3 松ダイナマイトの場合の弾丸及び砲の移動距離

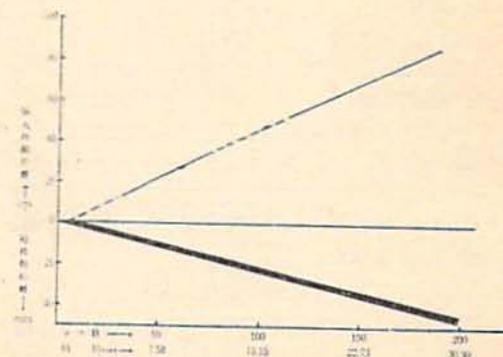


図4 T.N.T. の場合の弾丸及び砲の移動距離

た。黒色火薬、松ダイナマイト、T.N.T. の3種の薬に対するグラフを図2, 3, 4に示す。

上方が弾丸の移動曲線、下方が砲のそれである。縦軸は移動距離で、臼砲曲線の尺度は弾丸のそれの10倍に拡大してある。横軸はネガフィルムの任意コマよりのコマ数である。弾丸に対する測定点は滑らかな曲線上に乗り、この曲線は弾丸速度の遅い黒色火薬の場合を除いて、空気抵抗による減速の結果僅かに直線からはづれていることが認められる。曲線の初期傾斜から弾丸速度 v を求めると、表5の第1行に示すものとなる。臼砲については測定点がバラクが、直線的に分布している。線の太さは略々バラツキの大きさを示す。この傾斜から求めた臼砲速度 V を表5の第2行に示す。

表 5

	黒色火薬	松ダイナマイト	T.N.T.	平均
弾丸速度 v m/sec	25.172	43.739	32.67	-
臼砲速度 V m/sec	1.1625	2.0223	1.5048	-
慣性能率 I kg m ²	3396.1	3392.2	3405.1	3397.8
支点・重心間距離 h cm	256.55	256.26	257.23	256.68
Q cal	1086	3599	2632	

速度測定に用いた臼砲移動距離は僅かであるから、振り子の角速度 ω は支点回転間距離を a とすると、

$$\omega \approx V/a \quad \text{ラジアン/秒}$$

で求められる。角運動量保存則から

$$\omega I = mva$$

このとき撮影速度値は消去される。この式から振り子の支点の廻りの慣性能率 I を求め、更に $I = Mlh$ なる関係式を用いて h が得られる。得られた値を表5の第4, 第5行に示す。これらの値は夫々非常に良い一致を示している。これらの値の誤差は m, a 及び I の測定誤差の影響を考えぬときには1%以下である。

上の方法によつて求めた h と前節に述べた重錘を附加して週期の変化から求めた h とは誤差を介して一致している。しかし上の方法の方が精度が良いので、それによる値を平均して、本弾動臼砲の I 及び h として

$$I = 3397.8 \text{ kg m}^2$$

$$h = 256.68 \text{ cm}$$

を得た。

図2の黒色火薬の弾丸に対する移動曲線の初期は直

線上になく、弾丸がこの部分で加速されていることを示している。この部分を拡大したものが図5のA曲線である。

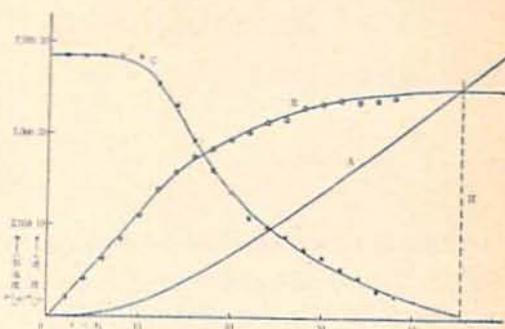


図5 A: 移動距離, B: 速度, C: 加速度

この曲線の傾斜から、各コマ数即ち各時間での速度を求め、滑らかな曲線にしたものが同図Bの速度曲線である。更にB曲線の各部の傾斜から加速度曲線Cを得る。点Hは弾丸後面が臼砲から離れる時刻を示し、この線の右方では加速度は0と考えられる。加速度を α とし、弾丸の後面の面積を S とすれば、臼砲内の内圧 P は

$$P = m\alpha/S$$

で求められる。黒色火薬の場合、臼砲内のガス圧は最高時で100気圧程度と算出される。爆発ガスにより弾丸に対して対してなされた仕事 W は

$$W = \int PdV = \sum \frac{m\alpha}{S} S \Delta d = \sum m\alpha \Delta d$$

但し、 V は臼砲内容積、 Δd は弾丸の移動量

なる式で数値積分して求めると、5417 Joul となる。一方弾丸の運動エネルギー、 $\frac{1}{2}mv^2$ は5513 Joul となり、よい一致を示した。従つて、図5のC曲線は2度の時間微分の操作をへたにも拘らずまず妥当なものと見て良い。

4. 弾動臼砲による爆力測定

弾動臼砲が爆薬から得た全機械的エネルギー Q は振り子の得たエネルギー E と、弾丸の得たエネルギー $\frac{1}{2}mv^2 = EI/ma^2$ の和である。即ち

$$Q = E(1 + I/ma^2)$$

となる。振子のフレの角度を θ とすれば $E=Mgh(1-\cos\theta)$ であるから

$$Q=Q_0(1-\cos\theta)$$

$$\text{但し, } Q_0=Mgh(1+Ima^2)$$

前記の I の測定値を用いると, $Q_0=61069$ cal であるから

$$Q=61069(1-\cos\theta) \text{ cal}$$

となる。

3種の薬に対する θ を入れて Q を求めると、表5の最終行に示した得を得る。爆発エネルギーは、黒色火薬の実験値¹⁾、950cal/g、松ダイナマイト²⁾、566cal/g、T.N.T.³⁾ 1,295cal/g ($J=1.50$)、1,065cal/g ($J=1.00$) 968cal/g ($J=0.5$) (J は装填比重)であるから、 Q は爆発エネルギーの黒色火薬で11%、松ダイナマイトで23%、T.N.T.で20.3%~34.3%となる。

臼砲を一衝撃熱機関と考え、作業物質としての爆発生成ガスが理想気体の法則に従うとすれば、その効率 η は

$$\eta=1-\left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\gamma-1}$$

で求められる。但し ϵ は圧縮比である。仮りに薬により占められる真容積を10ccとし、ガスの比熱比 γ を1.3とすると、 $\eta=43.3\%$ となる。 γ が上記の比率より高いのは、 γ を大きくとり過ぎたとも考えられるが、他に爆薬の有効エネルギーの概念を導入するとよい。

山家博士によれば、弾動臼砲の得た機械的エネルギー Q と、爆薬の有効エネルギー $F=fT_0/\gamma-1$ (計算値)との間には、kgm 単位で $Q=40+0.27F$ なる直線関係がある⁴⁾。 F は圧縮比無限大の場合に爆発ガスの成寸仕事量を意味し、爆発エネルギーのみでなく爆発温度 T_0 にも比例する。これによれば、黒色火薬の如く T_0 の低いものでは、 Q が低く出ることが理解される。

η は前記仮定の他に、ガス洩れ、内壁・弾丸の熱伝導損等を考えぬ理想値である。弾丸には起爆用導火線を通すため、中心軸に沿い、径 $1/4$ "の孔が貫通している。電気雷管を用いたときのこの孔からのガス洩れの影響を験べるため、孔にゴム栓を挿入した場合と、せぬ場合と、各6発発射実験をした結果は表6に示す如く有意差は認められぬ。因みに、表3の値との差は、

臼砲の累積発射数により、性能に変化のあることを示している⁵⁾。

表6 弾丸孔よりのガス洩れの影響

(昭和34年5月30日)

T.N.T. 10g \pm 0.01g, 6号雷管にて起爆

塞栓なし		塞栓あり	
発射順番	θ	発射順番	θ
1	14°50'	2	15°07'
3	15°04'	4	15°00'
5	15°05'	6	15°02'
7	15°08'	8	15°06'
9	15°04'	10	15°04'
11	14°48'	12	15°06'
平均	15°00'	平均	15°04'
標準偏差	7.8'	標準偏差	2.5'

5. 総括

当所の弾動臼砲の諸特性を、附加重錘による週期変化による方法及び Fastax 高速度カメラによる運動解析の2方法によつて求め、両者が誤差範囲内で一致することを示した。特に黒色火薬の場合、弾丸加速状況が解析され、砲内最高圧が100気圧程度であることが結論された。

また求められた支持点の回りの振子の慣性モーメント I を用い、3種の薬に対するエネルギー Q を求め、これと爆発エネルギーとの関係について考察した。

弾動臼砲は、爆力試験機として、更性はよいが、砲令によりフレの角 θ は減少する。

文 献

- 1) Comev: Proc. 8th Congress Applied Chemistry, 25, 209 (1912)
- 2) W. Taylor and G. Mocris: Trans. Far. Soc. 28, 545 (1932)
- 3) 西松唯一著: 「火薬学」共立社版 昭17年
- 4) J. Taylor: "Detonation in Condensed Explosives" Oxford at the Clarendon Press, (1952)
- 5) 山本祐徳: 「一般火薬学」
- 6) J. Taylor and J. H. Cook: J. Sci. Instr. 26, 266 (1949)

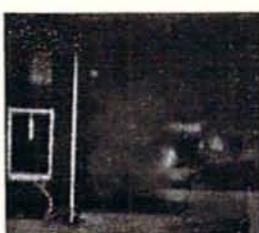
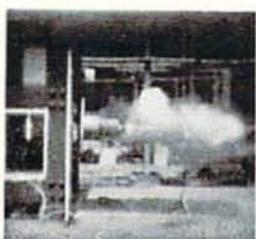
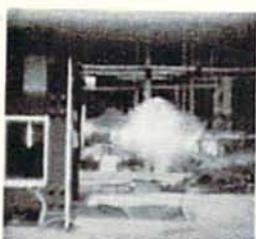
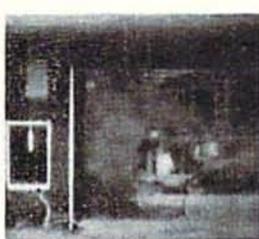


写真 A

松ダイナマイト

真横から撮影

各コマ間

1.04m.sec.

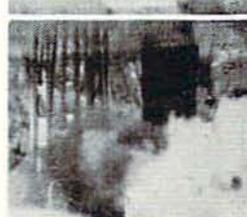
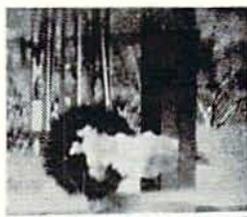


写真 B

T.N.T., 斜前方から撮影

12コマ迄 各コマ間

0.91m.sec.

12~13コマ間

約 30m.sec.

13~14コマ間

約 50m.sec.

On the Characteristics of the Ballistic Mortar

by Y. Mizushima and M. Kusakabe

The ballistic mortar is generally used for assessing the strength of a blasting explosive.

In our laboratory, it was installed in 1956 and has been utilized in routine work. The center of gravity and the moment of inertia around the suspension edge of its pendulum were determined in two ways. One way was through the period variation by an additive weight of the known moment of inertia, and another is through the motion analysis by

means of the high speed cinematography. Their results proved to agree within the experimental errors.

The observed value of the moment of inertia rendered the kinetic energy of the system evaluable. The evaluated values for three kinds of explosives were very smaller than the corresponding calorimetric energies of explosion. The correlation between them was discussed.
